

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais**  
**PPGEM**

**Controle Integrado da Qualidade de Processos de Manufatura**  
**de Revestimentos Cerâmicos**

**Carla Schwengber ten Caten**

**Tese para obtenção do título de Doutor**  
**em Engenharia**

**Porto Alegre, 16 dezembro de 1999**

**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**BIBLIOTECA**

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais**  
**PPGEM**

**Controle Integrado da Qualidade de Processos de Manufatura**  
**de Revestimentos Cerâmicos**

**Carla Schwengber ten Caten**

**Trabalho realizado no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia**

**Área de Concentração: Ciência dos Materiais**

**Porto Alegre, 16 de dezembro de 1999**



**Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração Ciência dos Materiais e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.**

**Orientadores: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Prof. Dr. José Luis Duarte Ribeiro**

**Banca Examinadora:**

**Prof. Dr. Vladilen dos Santos Villar**

**Prof. Dr. João Riboldi**

**Prof. Dr. Marcus Vinícius Veleda Ramires**

**Prof. Flávio Fogliatto, PhD.**

**Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGEM**

## AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores José Luis Duarte Ribeiro e Carlos Pérez Bergmann, pelas valiosas contribuições, sem as quais não seria possível a realização desta tese de doutorado.

Aos meus colegas e amigos, principalmente do PPGE/UFGRS, que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

Ao meu colega Celso Fritsch, pelo desenvolvimento do *software* do controle integrado da qualidade, sem o qual não seria possível a realização dos estudos de caso.

Aos meus familiares, que forneceram apoio e condições necessárias para a realização de meus estudos.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de estudo.

E por último, dedico esta tese ao meu esposo amado por todo seu estímulo e apoio emocional e profissional.

# SUMÁRIO

Lista de figuras.....	x
Lista de tabelas.....	xiii
Resumo.....	xv
Abstract.....	xvi
Glossário.....	xvii
1 COMENTÁRIOS INICIAIS .....	xix
1.1 Introdução.....	xix
1.2 Tema e justificativa .....	xx
1.3 Objetivos .....	xxiii
1.4 Método de desenvolvimento da pesquisa.....	xxiii
1.5 Estrutura da pesquisa.....	xxiv
1.6 Limitações da pesquisa .....	xxv
2 MATERIAIS CERÂMICOS.....	26
2.1 Origens do material cerâmico .....	26
2.2 Conceitos básicos e classificação.....	28
2.3 Características técnicas dos revestimentos cerâmicos .....	31
2.3.1 Absorção de água .....	31
2.3.2 Características dimensionais .....	32
2.3.3 Resistência mecânica.....	32
2.3.3.1 Resistência à flexão.....	32
2.3.3.2 Resistência ao impacto .....	33
2.3.3.3 Resistência à compressão .....	33
2.3.3.4 Resistência à abrasão.....	33
2.3.4 Dilatação.....	34
2.3.4.1 Dilatação térmica.....	34
2.3.4.2 Dilatação por expansão por umidade .....	35
2.3.5 Resistência ao gretamento .....	35
2.3.6 Resistência ao gelo .....	35
2.3.7 Resistência ao ataque químico e a manchas .....	36
2.3.8 Higiene .....	37
2.3.9 Resistência ao choque térmico .....	37
2.3.10 Estabilidade de cores.....	37
2.3.11 Comportamento ao fogo.....	37
2.3.12 Escorregamento.....	38
2.4 Matérias-primas.....	38
2.5 Processos produtivos .....	39
2.5.1 Preparação das matérias-primas: moagem .....	41
2.5.2 Conformação .....	41
2.5.2.1 Vantagens da modelagem (prensagem).....	41
2.5.2.2 Tipos de modelagem .....	42
2.5.2.3 Fases da modelagem.....	43
2.5.2.4 Variáveis de processo.....	43
2.5.2.5 Defeitos de modelagem.....	44
2.5.3 Secagem .....	46
2.5.3.1 Fases da secagem .....	47
2.5.3.2 Variáveis de processo.....	47
2.5.3.3 Defeitos de secagem.....	48



2.5.4	Queima do biscoito no processo biqueima.....	49
2.5.5	Esmaltação e decoração .....	49
2.5.5.1	Métodos de aplicação de esmalte .....	49
2.5.5.2	Variáveis de processo .....	50
2.5.5.3	Defeitos de esmaltação .....	50
2.5.6	Queima .....	51
2.5.6.1	Variáveis de processo .....	52
2.5.6.2	Fases da queima .....	52
2.5.6.3	Ação do calor sobre os produtos cerâmicos. ....	54
2.5.6.4	Defeitos de queima .....	54
3	CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO .....	56
3.1	Introdução ao controle estatístico do processo.....	56
3.1.1	Considerações iniciais .....	56
3.1.2	Definição do controle estatístico do processo .....	57
3.1.3	Objetivos do controle estatístico do processo.....	57
3.1.4	Origens históricas das cartas de controle .....	58
3.1.5	Sistema de controle do processo .....	59
3.1.5.1	O processo em si .....	59
3.1.5.2	Informações sobre o processo .....	59
3.1.5.3	Ações sobre o processo .....	59
3.1.5.4	Ações sobre o produto final .....	59
3.1.6	Variabilidade: causas comuns e causas especiais .....	60
3.1.6.1	Causas comuns .....	60
3.1.6.2	Causas especiais .....	62
3.1.7	Análise das cartas de controle .....	63
3.1.7.1	Análise da estabilidade do processo.....	63
3.1.7.2	Análise da capacidade do processo .....	65
3.1.7.3	Procedimento iterativo de melhoria .....	66
3.1.8	Inspeção versus controle estatístico do processo .....	68
3.1.8.1	Inspeção.....	68
3.1.8.2	Controle estatístico do processo.....	69
3.1.8.3	Vantagens do controle estatístico do processo.....	69
3.1.9	Etapas na implantação do controle estatístico do processo.....	70
3.2	Cartas de controle para variáveis.....	73
3.2.1	Introdução às cartas de variáveis.....	74
3.2.1.1	Distribuição de probabilidade .....	74
3.2.1.2	Teorema do limite central .....	76
3.2.1.3	Intervalos de confiança.....	78
3.2.2	Cartas de controle para a média .....	79
3.2.2.1	Coleta de dados .....	79
3.2.2.2	Cálculo dos limites de controle .....	81
3.2.2.3	Interpretação da estabilidade do processo.....	85
3.2.2.4	Interpretação da capacidade do processo .....	88
3.2.2.5	Rotina e melhoria no controle do processo .....	103
3.2.3	Carta de controle para o desvio-padrão.....	104
3.2.4	Carta de controle para a mediana ( $\bar{x}$ ) e amplitude ( $R$ ).....	107
3.2.5	Carta de controle para valores individuais .....	110
3.2.6	Cartas de controle para médias móveis .....	114
3.2.7	Escolha do tipo de carta de controle.....	116
3.3	Carta de controle para atributos... ..	117



3.3.1	Carta $p$ para fração de não-conformes.....	118
3.3.1.1	Coleta de dados .....	118
3.3.1.2	Cálculo dos limites de controle .....	118
3.3.1.3	Interpretação da estabilidade do processo .....	119
3.3.1.4	Interpretação da capacidade do processo .....	120
3.3.2	Carta $np$ para número de não-conformes .....	122
3.3.2.1	Coleta de dados .....	123
3.3.2.2	Cálculo dos limites de controle .....	123
3.3.3	Carta $c$ para número de não-conformidades.....	125
3.3.3.1	Coleta de dados .....	125
3.3.3.2	Cálculo dos limites de controle .....	125
3.3.4	Carta $u$ para número de não-conformidades por unidade .....	127
3.3.4.1	Coleta de dados .....	127
3.3.4.2	Cálculo dos limites de controle .....	128
3.3.5	Escolha do tipo de carta de controle.....	130
3.4	Carta de controle multivariada.....	131
4	CONTROLE INTEGRADO DA QUALIDADE DE PROCESSOS DE MANUFATURA DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS .....	136
4.1	Fundamentos do controle integrado da qualidade.....	137
4.1.1	Carta de controle integrada por posto .....	139
4.1.1.1	Cálculo do percentual de defeituosos associado a uma variável $k$ .....	140
4.1.1.2	Cálculo do percentual de defeituosos associado a um atributo $k$ .....	142
4.1.1.3	Cálculo do percentual de defeituosos do posto de controle .....	143
4.1.1.4	Cálculo dos limites de controle da carta do controle integrado da qualidade (carta $p$ ) do posto.....	144
4.1.2	Gráfico de Pareto por posto de controle.....	148
4.1.3	Cartas de controle específicas para cada característica de qualidade $k$ .....	149
4.1.4	Carta de controle integrada global .....	150
4.1.5	Gráfico de Pareto global.....	151
4.1.6	Carta de custos da má qualidade .....	153
4.2	Implantação do controle integrado da qualidade.....	155
4.2.1	Definição do projeto.....	155
4.2.1.1	Definição do escopo e objetivos do projeto .....	155
4.2.1.2	Definição da equipe de trabalho.....	155
4.2.1.3	Palestra de lançamento do projeto.....	156
4.2.2	Planejamento da implantação.....	156
4.2.2.1	Desdobramento da qualidade .....	157
4.2.2.2	Desdobramento dos processos .....	159
4.2.2.3	Direcionamento das ações.....	163
4.2.2.4	Identificação dos postos de controle e parâmetros e características de qualidade do processo a serem monitoradas em cada posto .....	164
4.2.2.5	Definição de critérios de classificação dos produtos (filtros) .....	166
4.2.2.6	Descrição dos parâmetros e características de qualidade do processo.....	167
4.2.2.7	Definição do procedimento de coleta de dados.....	168
4.2.2.8	Avaliação do sistema de medição .....	168
4.2.2.9	Definição de responsabilidades.....	169
4.2.2.10	Definição da documentação necessária.....	169
4.2.3	Treinamento em controle integrado da qualidade .....	170
4.2.4	Implantação efetiva .....	170
4.2.4.1	Início do monitoramento .....	170



4.2.4.2 Cálculo dos limites de controle .....	171
4.2.5 Acompanhamento e consolidação .....	171
4.3 Notas sobre o controle integrado da qualidade .....	172
5 ESTUDO DE CASO: IMPLANTAÇÃO DO CONTROLE INTEGRADO DA QUALIDADE EM UMA EMPRESA DE REVESTIMENTO CERÂMICO .....	174
5.1 Definição do projeto.....	174
5.1.1 Definição do escopo e objetivos do projeto .....	175
5.1.2 Definição da equipe de trabalho.....	175
5.1.3 Palestra de lançamento do projeto.....	176
5.2 Planejamento da implantação.....	176
5.2.1 Desdobramento da qualidade .....	176
5.2.2 Desdobramento dos processos .....	178
5.2.3 Direcionamento das ações.....	180
5.2.4 Identificação dos postos de controle e parâmetros e características de qualidade do processo a serem monitoradas em cada posto.....	182
5.2.5 Definição de critérios de classificação dos produtos (filtros) .....	183
5.2.6 Descrição dos parâmetros e características de qualidade do processo.....	183
5.2.7 Definição do procedimento de coleta de dados.....	184
5.2.8 Avaliação do sistema de medição .....	186
5.2.9 Definição de responsabilidades.....	186
5.2.10 Definição da documentação necessária.....	187
5.3 Treinamento em controle integrado da qualidade .....	188
5.4 Implantação efetiva .....	188
5.4.1 Início do monitoramento .....	189
5.4.2 Cálculo dos limites de controle .....	189
5.5 Acompanhamento e consolidação.....	189
5.5.1 Identificação do posto e item de controle mais crítico.....	189
5.5.2 Identificação da origem do problema.....	191
5.5.3 Priorização das ações de melhoria .....	194
5.5.4 Estudos de estabilidade e capacidade.....	195
5.5.5 Possíveis causas especiais responsáveis pelos defeitos de modelagem .....	197
5.6 Considerações finais do capítulo.....	199
5.6.1 Considerações referentes ao estudo de caso no setor cerâmico .....	199
5.6.2 Considerações referentes à implantação do controle integrado da qualidade....	200
5.6.2.1. Definição do projeto.....	201
5.6.2.2. Planejamento da implantação.....	201
5.6.2.3. Treinamento .....	201
5.6.2.4. Implantação efetiva .....	202
5.6.2.5. Acompanhamento e consolidação .....	202
5.7 Aplicações do controle integrado da qualidade em outros setores industriais.....	202
5.7.1 Setor calçadista.....	203
5.7.1.1. Definição do escopo e objetivos do projeto .....	203
5.7.1.2. Planejamento da implantação.....	203
5.7.1.3. Treinamento em controle integrado de processos .....	210
5.7.1.4. Implantação efetiva .....	211
5.7.1.5. Acompanhamento e consolidação .....	211
5.7.2 Setor de borrachas .....	215
5.7.2.1. Definição do escopo e objetivos do projeto .....	215
5.7.2.2. Planejamento da implantação.....	215
5.7.2.3. Treinamento em controle integrado de processos .....	223

5.7.2.4.	Implantação efetiva .....	223
5.7.2.5.	Acompanhamento e consolidação .....	224
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	225
6.1.	Conclusões .....	225
6.2.	Sugestões para trabalhos futuros .....	227
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....	229



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Fluxogramas dos processos de produção de revestimentos cerâmicos.....	40
Figura 3.1	Distribuição de probabilidade de um processo. ....	61
Figura 3.2	Parâmetros de uma distribuição de probabilidade.....	61
Figura 3.3	Exemplo de uma carta de controle. ....	63
Figura 3.4	Distribuição de probabilidade de um processo estável versus instável.....	64
Figura 3.5	Cartas de controle de um processo estável versus instável. ....	64
Figura 3.6	Ações dirigidas pelas cartas de controle. ....	65
Figura 3.7	Avaliação da capacidade de um processo estável versus instável. ....	66
Figura 3.8	Procedimento iterativo de melhoria. ....	67
Figura 3.9	Distribuição de probabilidade de um processo com inspeção 100% versus CEP.....	68
Figura 3.10	Distribuição de probabilidade dos valores individuais. ....	74
Figura 3.11	Distribuição de probabilidade de três amostras distintas. ....	75
Figura 3.12	Teorema do limite central. ....	76
Figura 3.13	Distribuição de probabilidade dos valores individuais versus distribuição de probabilidade das médias. ....	77
Figura 3.14	Distribuição de probabilidade das médias.....	79
Figura 3.15	Exemplo de carta de controle para a média.....	84
Figura 3.16	Exemplo de carta de controle para a amplitude. ....	85
Figura 3.17	Exemplo de padrões e corridas não aleatórios no processo. ....	86
Figura 3.18	Reavaliação dos limites de controle. ....	87
Figura 3.19	Processo capaz e não capaz dependendo das especificações. ....	88
Figura 3.20	Processo estável e capaz com o passar do tempo. ....	89
Figura 3.21	Exemplo de histograma e polígono de frequência. ....	91
Figura 3.22	Exemplo do teste de normalidade de valores teóricos de $Z$ .....	93
Figura 3.23	Limites naturais da distribuição dos valores individuais. ....	94
Figura 3.24	Percentuais associados a faixa de $\pm 1 \sigma$ , $\pm 2 \sigma$ e $\pm 3 \sigma$ da distribuição Normal, para uma população com média 28,4 e desvio-padrão 0,20.....	95
Figura 3.25	Exemplo de processo capaz e não capaz. ....	96
Figura 3.26	Processo descentrado versus processo centrado.....	97
Figura 3.27	Distribuição de probabilidade dos valores reais e codificados. ....	99
Figura 3.28	Distribuição de probabilidade do exemplo da fresa. ....	100
Figura 3.29	Distribuição de probabilidade do exemplo da fresa com o processo centrado. ....	101
Figura 3.30	Processo iterativo de melhoria do processo. ....	104
Figura 3.31	Exemplo de carta de controle para a média.....	107
Figura 3.32	Exemplo de carta de controle para o desvio-padrão. ....	107
Figura 3.33	Exemplo de carta de controle para a mediana. ....	110
Figura 3.34	Exemplo de carta de controle para a amplitude. ....	110
Figura 3.35	Carta de controle para valores individuais (retirando causas especiais). ....	113
Figura 3.36	Carta de controle para amplitude móvel (retirando causas especiais). ....	113
Figura 3.37	Carta de controle para média móvel (retirando causas especiais).....	115
Figura 3.38	Exemplo da carta de controle para médias móveis. ....	116
Figura 3.39	Fluxograma de apoio para escolha das cartas de controle. ....	117
Figura 3.40	Carta $p$ para o exemplo dos eixos defeituosos (retirando causas especiais). ....	122
Figura 3.41	Carta $np$ para o exemplo das peças plásticas.....	124
Figura 3.42	Carta $p$ (equivalente a $np$ ) para o exemplo das peças plásticas.....	125
Figura 3.43	Carta $c$ para o exemplo do número de defeitos de pintura. ....	127



Figura 3.44	Carta $u$ para o exemplo do número de defeitos superficiais por unidade. ....	130
Figura 3.45	Fluxograma de apoio para escolha das cartas de controle. ....	130
Figura 3.46	Exemplo de carta multivariada para duas variáveis. ....	132
Figura 4.1	Estratégia de ação do controle integrado da qualidade. ....	138
Figura 4.2	Histograma do estudo de simulação. ....	142
Figura 4.3	Valores de eficiência: relação entre a variab. do % defeituosos obtida a partir da contagem de defeituosos e inferida a partir do uso das médias e desvios móveis. ....	146
Figura 4.4	Exemplo da carta do controle integrado da qualidade (carta $p$ ) do posto 4. ....	148
Figura 4.5	Exemplo do gráfico de Pareto do percentual médio de defeituosos associado a cada características de qualidade do posto 4. ....	149
Figura 4.6	Exemplo da carta de controle de média para a característica de qualidade do tipo variável. ....	150
Figura 4.7	Exemplo da carta de controle de defeitos para a característica de qualidade do tipo atributo. ....	150
Figura 4.8	Exemplo da carta do controle integrada global. ....	151
Figura 4.9	Exemplo do gráfico de Pareto global do percentual médio de defeituosos associado a cada características de qualidade. ....	153
Figura 4.10	Carta de custos da má qualidade. ....	154
Figura 4.11	Carta de custos da má qualidade suavizada. ....	154
Figura 4.12	Desdobramento da qualidade. ....	159
Figura 4.13	Exemplo de desdobramento da qualidade. ....	159
Figura 4.14	Desdobramento dos processos. ....	161
Figura 4.15	Exemplo do desdobramento dos processos. ....	161
Figura 4.16	Ações possíveis para os processos críticos. ....	164
Figura 4.17	Exemplo da matriz de ações possíveis. ....	164
Figura 4.18	Identificação dos postos e alocação das C.Q. em cada posto. ....	165
Figura 4.19	Exemplo de características de qualidade alocadas no posto 2. ....	165
Figura 4.20	Desenho esquemático das primeiras quatro etapas do planejamento da implantação de controle integrado da qualidade. ....	165
Figura 5.1	Matriz da qualidade obtida no estudo de caso na empresa cerâmica. ....	178
Figura 5.2	Matriz do processo do estudo de caso na empresa cerâmica (parte da matriz completa). ....	180
Figura 5.3	Matriz de ações do estudo de caso na empresa cerâmica (parte da matriz completa). ....	181
Figura 5.4	Planilha de coleta de dados do posto 4 – modelagem. ....	188
Figura 5.5	Carta integrada do posto V - polimento agrupando os produtos fabricados com os dois tipos de massa (base e branco) e dois tamanhos de bitola (30 x 30 e 40 x 40). ....	190
Figura 5.6	Gráfico de Pareto para o posto V - polimento agrupando os produtos fabricados com os dois tipos de massa (base e branco) e dois tamanhos de bitola (30x30 e 40x40). ....	191
Figura 5.7	Carta integrada do posto III - modelagem agrupando os produtos fabricados com os dois tipos de massa (base e branco) e dois tamanhos de bitola (30 x 30 e 40 x 40). ....	192
Figura 5.8	Carta do posto III - modelagem filtrando os produtos fabricados com tipo de massa branco e agrupando os dois tamanhos de bitola (30 x 30 e 40 x 40). ....	192
Figura 5.9	Carta do posto III - modelagem filtrando os produtos fabricados com tipo de massa base e agrupando os dois tamanhos de bitola (30 x 30 e 40 x 40). ....	193
Figura 5.10	Carta de controle integrada do posto III filtrando os produtos produzidos com tipo de massa base e bitola 40 x 40. ....	193
Figura 5.11	Carta de controle integrada do posto III filtrando os produtos produzidos com tipo de massa base e bitola 30 x 30. ....	194

Figura 5.12 Gráfico de Pareto para o posto III – modelagem filtrando os produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 30 x 30. ....	195
Figura 5.13 Carta de média da densidade aparente filtrando os produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 30 x 30. ....	196
Figura 5.14 Carta de desvio-padrão da densidade aparente filtrando os produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 30 x 30. ....	196
Figura 5.15 Estudo de capacidade da densidade aparente filtrando os produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 30 x 30. ....	197
Figura 5.16 Exemplo da matriz de desdobramento da qualidade. ....	204
Figura 5.17 Exemplo da matriz de desdobramento de processos. ....	204
Figura 5.18 Exemplo da matriz de ações possíveis. ....	205
Figura 5.19 Planilha de coleta de dados do posto de controle 1. ....	210
Figura 5.20 Carta da média ponderada de defeitos por unidade do posto 1. ....	212
Figura 5.21 Gráfico de Pareto da soma ponderada de defeitos acumulada para o posto 1. ..	213
Figura 5.22 Carta global da média ponderada de defeitos por unidade. ....	213
Figura 5.23 Gráfico de Pareto da soma ponderada de defeitos acumulada global. ....	214
Figura 5.24 Matriz da qualidade obtida no estudo de caso (resumida). ....	216
Figura 5.25 Matriz dos processos obtida no estudo de caso (resumida). ....	217
Figura 5.26 Matriz de processos referente ao direcionamento das ações de melhoria para os parâmetros dos processos no estudo de caso (resumida). ....	218
Figura 5.27 Planilha de coleta de dados do posto vulcanização do estudo de caso. ....	223



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Classificação dos revestimentos cerâmicos conforme o tipo de produto.....	30
Tabela 2.2	Classificação dos materiais cerâmicos conforme a absorção de água e conformação.....	31
Tabela 2.3	Classificação dos materiais cerâmicos conforme a resistência à abrasão.....	34
Tabela 2.4	Classificação dos materiais cerâmicos conforme a facilidade de limpeza.....	36
Tabela 2.5	Mecanismo de transporte.....	51
Tabela 3.1	Resumo das causas comuns e especiais.....	62
Tabela 3.2	Dados de três amostras distintas.....	75
Tabela 3.3	Dados do exemplo da fresa: identificação mais tabela de dados.....	81
Tabela 3.4	Valores das constantes $D_4$ , $D_3$ , $d_2$ e $A_2$ .....	84
Tabela 3.5	Tabela de frequência da espessura de peças cerâmicas.....	90
Tabela 3.6	Valores de $X_{(i)}$ , $F(X_{(i)})$ e $Z_{teórico}$ para a espessura.....	92
Tabela 3.7	Valores da constante $d_2$ e $c_4$ .....	94
Tabela 3.8	Valores de $C_{pk}$ e a respectiva quantidade de peças fora de especificação.....	103
Tabela 3.9	Valores das constantes $B_4$ , $B_3$ e $A_3$ .....	105
Tabela 3.10	Dados do exemplo da fresa.....	106
Tabela 3.11	Valores da constante $\tilde{A}_2$ .....	108
Tabela 3.12	Dados do exemplo da fresa.....	109
Tabela 3.13	Valores da constante $E_2$ .....	111
Tabela 3.14	Valores de viscosidade de bateladas químicas.....	112
Tabela 3.15	Valores de médias móveis para a viscosidade.....	115
Tabela 3.16	Dados do exemplo da carta $p$ .....	121
Tabela 3.17	Dados do exemplo da carta $np$ .....	124
Tabela 3.18	Dados do exemplo da carta $c$ .....	126
Tabela 3.19	Dados do exemplo da carta $u$ .....	129
Tabela 4.1	Escala da intensidade das relações.....	158
Tabela 4.2	Escala de capacidade das etapas dos processo produtivos.....	162
Tabela 4.3	Escala de conhecimento das etapas dos processo produtivos.....	162
Tabela 4.4	Escala da intensidade da aplicação das ações corretivas.....	163
Tabela 5.1	Cronograma de implantação do CIQ na empresa cerâmica.....	175
Tabela 5.2	Pesos finais para os itens da demanda de qualidade no estudo de caso da empresa cerâmica.....	177
Tabela 5.3	Descrição dos postos de controle definidos no estudo de caso da empresa cerâmica.....	182
Tabela 5.4	Parâmetros e características de qualidade do processo do posto 4-modelagem.....	182
Tabela 5.5	Descrição dos critérios de classificação.....	183
Tabela 5.6	Descrição dos parâmetros e características dos processos do posto 4-modelagem. .....	184
Tabela 5.7	Definição do procedimento de coleta de dados do posto 4-modelagem.....	185
Tabela 5.8	Definição de responsabilidades do posto 4 – modelagem.....	187
Tabela 5.9	Localização dos postos de controle.....	205
Tabela 5.10	Lista de defeitos para o posto 1 (após o corte).....	206
Tabela 5.11	Descrição dos critérios de classificação definidos para o estudo de caso.....	206
Tabela 5.12	Descrição dos parâmetros e características dos processos do posto 1 do estudo de caso.....	207
Tabela 5.13	Descrição do procedimento de coleta de dados do posto 1 do estudo de caso... ..	208

Tabela 5.14 Definição de responsabilidades no posto 1 do estudo de caso.....	209
Tabela 5.15 Descrição dos postos de controle no estudo de caso.....	219
Tabela 5.16 Parâmetros e características de qualidade dos processos alocados no posto vulcanização (posto 8).....	219
Tabela 5.17 Descrição dos critérios de classificação definidos para o estudo de caso.....	219
Tabela 5.18 Descrição dos parâmetros e características dos processos do posto vulcanização no estudo de caso.....	220
Tabela 5.19 Descrição do procedimento de coleta de dados do posto vulcanização no estudo de caso. ....	221
Tabela 5.20 Definição de responsabilidades no posto vulcanização do estudo de caso.....	222



## RESUMO

Essa tese versa sobre um procedimento inovador para o controle e garantia da qualidade em processos de manufatura onde existem vários atributos e variáveis a serem monitorados, como acontece, por exemplo, na indústria cerâmica. O procedimento proposto, chamado de controle integrado da qualidade, começa com a definição de alguns postos de controle na linha de produção, onde o monitoramento será feito usando uma única carta de controle que agrega vários atributos e variáveis. Esse procedimento é complementado usando gráficos de Pareto, que hierarquizam as características de qualidade que contribuem mais fortemente para o percentual de defeituosos do posto, e as cartas de controle tradicionais, que são utilizadas seletivamente, apenas conforme a indicação dos gráficos de Pareto. A utilização conjunta dessas ferramentas auxilia no diagnóstico e solução dos problemas de qualidade, permitindo que as ações de melhoria aconteçam no tempo e local certo. Entre as vantagens do procedimento proposto, cita-se: (a) a simplicidade do controle integrado, que foca prioritariamente umas poucas cartas de controle; (b) a abordagem estatística, que fornece uma base sólida para a tomada de decisões; e (c) o forte apelo gerencial fornecido pelo controle integrado, que disponibiliza a cada amostra uma visão geral da condição de qualidade nos postos de controle e na linha de produção como um todo.

A tese apresenta também uma abordagem sistemática para auxiliar na implantação do controle integrado da qualidade. Essa abordagem contempla 5 etapas principais: definição do projeto, planejamento da implantação, treinamento, implantação efetiva e acompanhamento e consolidação.

Por fim, é apresentado e discutido um estudo de caso em uma indústria cerâmica, que contribui para a validação do método proposto. Com base nesse estudo de caso e no referencial teórico, conclui-se sobre o assunto.

**Palavras chaves:** Cerâmica, Qualidade, Controle Estatístico do Processo

## ABSTRACT

This dissertation presents a new procedure, *Integrated Quality Control*, for quality control and assurance in situations where several variables and attributes are to be monitored. That is the case in the ceramics manufacturing industry, for example. The procedure is implemented by defining control (or work) stations in the production line; variables and attributes in each station are monitored simultaneously using an aggregated control chart for the percentages of non-conformities. When a signal occurs, a Pareto graph sorts out variables and attributes identifying those contributing the most to its occurrence: such variables and attributes are then examined using traditional control charts. The joint use of aggregate charts, Pareto graphs and univariate control charts turns monitoring and improvement of processes into a non-complex task. A systematic approach for the implementation of Integrated Quality Control is also presented. The approach comprises five main steps: project definition, implementation planning, training of personnel, effective implementation, and follow up. Key advantages of the procedure suggested here are: (i) ability to handle variables and attributes in a single integrated chart, (ii) the statistical approach which provides a solid basis for the decision-making, and (iii) strong managerial appeal provided by the integrated charts. The procedure is illustrated with a case study conducted in a ceramic plant. Some conclusions are drawn based on the results of this case study and in the theoretical references.

**Key words:** Ceramic, Quality, Statistical Process Control

## GLOSSÁRIO

**Amostra** – É um conjunto de peças que serão avaliadas quanto a um determinado item de controle (característica de qualidade). Também chamada de subgrupo.

**Atributos** – São itens de controle que são comparados com um certo padrão e são classificados como conforme ou não-conforme o padrão. Podem assumir apenas valores discretos.

**Capacidade do processo** – Um processo capaz é aquele que consegue fabricar peças conforme as especificações exigidas pelos clientes.

**Característica de qualidade** – São itens de controle que avaliam o desempenho do processo de manufatura. As características de qualidade podem ser características intermediárias do processo ou características finais do produto.

**Cartas de controle** – São gráficos onde se plota uma série temporal da característica de qualidade e compara-se com os limites de controle. Também chamadas de gráficos de controle.

**Causas comuns** - São as diversas pequenas causas de variação que estão sempre presentes em todos os processos. Elas são mais difíceis de identificar e eliminar e são responsáveis pela variabilidade inerente ao processo.

**Causas especiais** - São causas imprevisíveis que provocam grandes variações no resultado do processo e por isso devem ser identificadas e neutralizadas. Também chamadas de causas atípicas.

**Controle estatístico do processo (CEP)** - É um sistema de inspeção por amostragens realizadas ao longo do processo, com o objetivo de verificar a presença de causas especiais, ou seja, causas que podem prejudicar a qualidade do produto.

**Capacidade efetiva ( $C_{pk}$ )** – É um índice adimensional que avalia a capacidade efetiva do processo produzir peças conforme as especificações.

**Capacidade potencial ( $C_p$ )** - É um índice adimensional que avalia a capacidade potencial do processo produzir peças conforme as especificações. Ou seja, a capacidade do processo caso a média do processo coincida com o valor nominal das especificações.

**Estabilidade do processo** – Um processo estável é aquele que apresenta sempre o mesmo comportamento ao longo do tempo.

**Fatores de ruído** – São variáveis que o engenheiro não consegue controlar durante o processo de manufatura. São responsáveis pelo erro experimental do processo.



**Gráfico de Pareto** – É um gráfico que apresenta os itens de controle em ordem decrescente.

**Limites de controle** – São linhas plotadas nas cartas de controle que representam a variabilidade inerente do processo, associada com as causas comuns de variabilidade.

**Parâmetros do processo** – São aspectos do processo que podem ser controlados pelos engenheiros e que possivelmente possam ter algum efeito sobre o resultado do processo. Também podem ser chamados de fatores controláveis.

**Processo** – É um conjunto de atividades que são realizadas e que geram um resultado (característica de qualidade).

**Sinal estatístico** – É uma advertência de que o processo mudou, logo deve-se investigar o que provocou a alteração (causa especial). Essa advertência ocorre quando a amostra plotada na carta de controle excede os limites de controle.

**Variáveis** – São itens de controle que são medidos através de um sistema de medição e podem assumir quaisquer valores dentro de um intervalo.



# 1 COMENTÁRIOS INICIAIS

## 1.1 Introdução

Segundo Taguchi, Elsayed e Hsiang (1990), o preço do produto representa uma perda para o consumidor na hora da compra, e a baixa qualidade acarreta perdas adicionais que ocorrem durante o uso do produto.

A preocupação de relacionar qualidade e custos aparece evidenciada, por exemplo, na definição de qualidade proposta por Taguchi que diz que a qualidade de um produto pode ser avaliada através da perda imposta pelo produto à sociedade, desde que o produto é fabricado até o final de sua vida útil.

Taguchi propõe uma visão holística que relaciona qualidade com a perda financeira incorrida, não somente para a empresa, mas também para a sociedade que experimenta uma perda toda vez que um produto tem suas características de qualidade desviadas do valor nominal de projeto ou apresenta variabilidade em torno desse valor. Essa perda financeira, denominada de custo da má qualidade inclui: refugo e retrabalho; custos de garantia; reclamação e insatisfação do cliente; tempo e dinheiro gastos pelos clientes e eventual perda da fatia de mercado.

Uma importante função do engenheiro é reduzir a perda financeira experimentada pelo consumidor durante o uso do produto. Para isso, é necessário monitorar a qualidade dos processos produtivos a fim de garantir alta qualidade nos produtos manufaturados, reduzindo os custos da má qualidade impostos à sociedade.

A garantia da qualidade dos produtos manufaturados ocorre através do monitoramento dos parâmetros do processo e das características que compõem a qualidade de um produto.

## 1.2 Tema e justificativa

O tema dessa tese é o controle e garantia da qualidade em ambientes industriais onde existem vários atributos e variáveis a serem monitorados, como acontece por exemplo na indústria cerâmica.

O controle estatístico de processo (CEP) utiliza cartas de controle (gráficos) no monitoramento do desempenho de processos e tem como objetivo garantir a qualidade do produto manufaturado. As cartas de controle utilizam como dados de entrada medições de um parâmetro do processo ou característica da qualidade de interesse, ou seja, de uma variável ou atributo que influencie ou represente a qualidade dos itens manufaturados.

As medições são realizadas com uma certa frequência no tempo e são registradas periodicamente nas cartas de controle, sendo então comparadas contra limites de controle que representam o padrão de qualidade histórico.

Se as medições realizadas estiverem fora do padrão de qualidade histórico (ou seja, fora dos limites de controle), tem-se um indicativo da presença de causas especiais atuando no processo, ou seja, causas anômalas e prejudiciais à qualidade do produto manufaturado. Uma vez identificadas as causas especiais, deve-se disparar ações corretivas e preventivas que busquem eliminar as causas especiais e evitar que elas ocorram novamente.

Segundo Montgomery e Woodall (1997), as técnicas de controle estatístico de processo estão sendo muito usadas. Nos últimos vinte anos, tem acontecido consideráveis mudanças na competitividade das empresas na economia mundial. Nesse cenário, tem crescido a ênfase no uso do controle estatístico de processo como uma abordagem prática para reduzir a variabilidade em aplicações industriais. Simultaneamente, tem crescido o interesse da comunidade acadêmica em pesquisar novas técnicas e procedimentos, assim como em avaliar a eficiência e limitações das técnicas que estão sendo usadas atualmente.

Segundo Palm *et alli* (1997), atualmente existem três grupos com perspectivas distintas sobre os métodos de controle estatístico de processo. O primeiro grupo está interessado principalmente nas aplicações dos métodos tradicionais de CEP nas diversas áreas e indústrias. Ele está interessado nos aspectos competitivos e nos programas de melhoria da qualidade. O segundo grupo está interessado em desenvolver e aplicar métodos avançados em indústrias de processo onde existem muitos dados *on-line* e onde a resposta rápida a uma condição fora de controle é crítica. Esse grupo é composto por estatísticos bem treinados em CEP, trabalhando conjuntamente com engenheiros conhecedores dos processos. O grupo 3



tem um interesse acadêmico nos métodos de controle estatístico. Esse grupo é composto por pesquisadores de universidades que desenvolvem variações nos gráficos de controle.

Quando implementado corretamente, o CEP promove melhorias na qualidade, produtividade e confiabilidade, assim como redução dos custos da má qualidade e, por conseguinte, do custo total do produto manufaturado. Para maiores informações sobre o controle estatístico de processo, ver, por exemplo, Ott (1975), Montgomery (1985) Duncan (1986), Box *et alli* (1988), Pitt (1994) ou Werkema (1995).

No entanto, tem-se observado que muitos projetos de controle estatístico do processo não estão obtendo sucesso na obtenção de seus objetivos. As falhas geralmente devem-se à falta de uma abordagem sistemática de implementação, à falta de critérios na escolha dos parâmetros de processo e características de qualidade a serem monitorados, à falta de tempo e recursos humanos para fazer o monitoramento em tempo real das cartas de controle e à própria abordagem do CEP, que não é adequada para lidar com um número muito grande de variáveis e atributos.

A automatização de processos vem sendo adotada como diretriz empresarial, na busca da modernização e aumento de competitividade, em diferentes segmentos industriais. Processos automatizados permitem a medição simultânea e em tempo real de inúmeras variáveis de produto e processo, fornecendo dados em quantidade suficiente para o monitoramento preciso do desempenho global de operações industriais. Tal riqueza de informações deve ser tratada de maneira apropriada, visando fornecer subsídios à tomada de decisões gerenciais.

Analogamente e também visando uma melhoria competitiva, diversas empresas têm buscado a certificação através das normas da série ISO 9000, QS-9000 ou ISO 14000. Tais normas demandam um monitoramento rigoroso de variáveis de processo e produto, gerando um grande volume de dados. Esses dados nem sempre são transformados, de maneira eficiente, em informações que facilitem a prática do gerenciamento da qualidade.

Na indústria cerâmica, assim como em outros setores industriais, centenas de variáveis e atributos devem ser monitorados simultaneamente para garantir a qualidade do produto manufaturado. As cartas de controle tradicionais monitoram individualmente cada variável ou atributo. Nessas indústrias, o uso dos procedimentos tradicionais de controle estatístico de processo não é viável, pois faltariam recursos humanos para preencher e interpretar a estabilidade e capacidade de um número tão elevado de cartas de controle.

Esse cenário serviu de motivação para o desenvolvimento do controle integrado da qualidade, que se propõe a revolucionar as atividades de monitoramento da qualidade.

Conforme será detalhado na sequência desta tese, o controle integrado da qualidade consegue atingir dois objetivos que são paradoxais sob o ponto de vista das técnicas tradicionais de controle estatístico: (a) diminuir radicalmente o esforço necessário à análise e interpretação dos dados de qualidade e (b) propiciar um acesso total às informações referentes à qualidade dos processos e produtos.

Outra motivação está relacionada ao fato de que as melhorias de qualidade nos processos produtivos têm levado a baixos percentuais de defeituosos ou número de defeitos. Quando o número de defeitos é pequeno, é necessário monitorar amostras grandes que tendem a uma inspeção cem por cento. Assim, fica difícil, ou mesmo impossível, o controle de atributos usando as cartas tradicionais. A alternativa é trabalhar com postos de controle distribuídos ao longo da linha de produção, sendo que em cada posto monitoram-se cartas de controle que integram vários atributos. Na medida em que essas cartas agregam vários tipos de defeitos, elas recuperam o poder do teste estatístico e, dessa forma, permitem reduzir o tamanho da amostra.

Adicionalmente, em um determinado posto de controle, pode ser necessário monitorar variáveis além de atributos. Para isso, é necessário desenvolver uma metodologia que faça o controle integrado de atributos e variáveis, através do uso de uma única carta para o posto de controle. Ou seja, é necessário um procedimento que permita reduzir atributos e variáveis a um único parâmetro, de modo que possam ser tratados conjuntamente.

Montgomery e Woodall (1997) realizaram uma revisão bibliográfica de 175 artigos relacionados ao controle estatístico de processo e Woodall (1997) realizou uma revisão de 257 artigos de cartas de controle de atributos. Os tópicos apresentados nos artigos são gráficos de controle de Shewart, aplicações de gráficos de controle na indústria, cartas Multivariadas, dados correlacionados, métodos CUSUM e EWMA, cartas de controle Fuzzy, projetos econômicos de cartas de controle, tamanhos e frequência de amostra variáveis, modelos Binomial e Poisson entre outros. Nesta extensa revisão bibliográfica não foi citado nenhum artigo que se preocupasse em como gerenciar um grande número de cartas de controle de variáveis e atributos simultaneamente.

Os fundamentos do controle integrado da qualidade, desenvolvidos gradualmente pela autora, em conjunto com outros pesquisadores, aparecem em Ribeiro e Caten (1998), Caten e Ribeiro (1998), Ribeiro, Caten e Fritsch (1998) e Caten, Ribeiro e Fogliatto (1999).



## 1.3 Objetivos

O objetivo principal dessa pesquisa é, a partir da revisão detalhada da literatura e da experiência acumulada ao longo de estudos de caso, estabelecer um método capaz de controlar, de forma integrada, todas as variáveis e atributos que garantam a qualidade do produto final.

Além disso, também é objetivo da pesquisa desenvolver uma sistemática para a implantação do método proposto, a qual deve ser detalhada em todas as suas etapas. Pretende-se sugerir técnicas que possam ser utilizadas para executar com sucesso cada etapa prevista.

O objetivo secundário desta tese é testar o método no ambiente específico das empresas cerâmicas, que possuem uma série de particularidades, como por exemplo, grande número de variáveis, necessidade de monitoramento de variáveis e atributos, produto que se origina de uma massa e se transforma em peças, grande variedade de produtos e produção ininterrupta.

## 1.4 Método de desenvolvimento da pesquisa

O método de pesquisa científica proposto para esta tese de doutorado enquadra-se, de acordo com a classificação apresentada por Patton *apud* Roesch (1994), na categoria de pesquisa aplicada. A pesquisa aplicada consiste na aplicação da pesquisa básica a problemas do mundo real. O propósito da pesquisa aplicada inclui uma preocupação teórica, seja o refinamento ou mesmo o desenvolvimento de uma nova teoria ou método para intervenção e solução de problemas genéricos. A pesquisa aplicada refere-se à discussão de um problema, utilizando-se um referencial teórico, e à apresentação de soluções. Espera-se que o tema da pesquisa aplicada seja tão generalizável no tempo e no espaço quanto possível, mas limitado ao contexto de sua aplicação.

Primeiramente, será feita uma revisão detalhada da literatura abordando dois temas principais: (a) controle de qualidade e (b) revestimentos cerâmicos e sua manufatura.

Baseado na literatura e no contato com outros pesquisadores experientes na área de controle de qualidade, apresentar-se-á um método adequado para o controle e garantia da

qualidade em processos de manufatura onde há muitos atributos e variáveis a serem monitorados.

O método proposto foi construído passo a passo, inicialmente contemplando apenas o controle integrado de atributos. Com a utilização do método em indústrias, surgiu a necessidade de incorporar o monitoramento conjunto de variáveis e atributos.

Na sequência, ainda com base na literatura, mas também contando com a experiência prática da autora, será desenvolvida uma abordagem sistemática para a implantação do controle integrado da qualidade. Uma abordagem similar era utilizada para a implantação do CEP, a qual foi estendida e adaptada para a implementação do controle integrado de qualidade.

Com o auxílio de pesquisadores do Laboratório de Otimização de Produtos e Processos (LOPP/UFRGS), será desenvolvido um *software* para o gerenciamento do controle integrado da qualidade. No entanto, o software não será apresentado por não ser o escopo desta tese.

Posteriormente, será apresentado um estudo de caso em uma empresa cerâmica e discussões a fim de enriquecer e contribuir para a validação do método e da proposta de implantação.

Por último, baseado no estudo de caso e no referencial teórico, serão apresentadas as conclusões obtidas ao longo da pesquisa.

## **1.5 Estrutura da pesquisa**

Nesta pesquisa, apresenta-se no capítulo 1 primeiramente os comentários iniciais que contemplam a introdução, o tema e justificativas, os objetivos, o método de desenvolvimento da pesquisa, a estrutura da pesquisa e as limitações da pesquisa.

No capítulo 2, apresenta-se uma revisão sobre revestimentos cerâmicos e seus processos de manufatura e os possíveis defeitos que podem gerar perda de qualidade no produto.

No capítulo 3, apresenta-se uma revisão da literatura existente sobre o controle estatístico do processo. Nesse capítulo é apresentada a evolução histórica, os conceitos, os cálculos dos limites de controle, os procedimentos, os estudos de estabilidade e capacidade e as etapas da implementação do controle estatístico do processo.

No capítulo 4, apresenta-se um método capaz de controlar, de maneira integrada, as variáveis e atributos monitoradas no processo produtivo a fim de garantir a qualidade do produto manufaturado. Nesse capítulo, é discutida uma abordagem sistemática para a implementação do método proposto, sugerindo-se uma seqüência de etapas a serem cumpridas.

No capítulo 5, o uso do método apresentado e os resultados obtidos são demonstrados através de um estudo de caso em uma indústria de revestimentos cerâmicos. O que se pretende neste capítulo é verificar a validade e eficiência do método apresentado nesta tese.

As conclusões obtidas ao longo da pesquisa a respeito do método apresentado e dos resultados alcançados com seu uso são discutidos no capítulo 6. Nesse capítulo, apresenta-se também sugestões para trabalhos futuros.

## **1.6 Limitações da pesquisa**

A pesquisa propõe um método capaz de monitorar, de forma integrada, as variáveis e atributos que garantam a qualidade do produto final e propõe uma abordagem sistemática para a sua implantação.

O método proposto pretende ser suficientemente genérico e flexível para poder ser utilizado em qualquer tipo de indústria. Ele foi testado nas indústrias de cerâmica, calçados e borracha. No entanto, em outras indústrias pode ser necessária a incorporação de outras etapas ou outras técnicas para a implementação eficaz do método proposto.

O método proposto nesta tese não prevê integração com a norma ISO 9000 ou outras normas de qualidade e com os demais setores da empresa como, por exemplo, o setor de fornecimento, produção ou vendas.

O método proposto faz uma estimativa superficial dos custos da má qualidade. A análise detalhada dos custos da má qualidade é uma tarefa complexa e foge do escopo desta tese.

O método proposto considera as variáveis e atributos independentes, o que pode não ser o caso em algumas aplicações.



## **2 MATERIAIS CERÂMICOS**

A estrutura deste capítulo foi concebida da seguinte forma: no item 2.1, será apresentada a origem do material cerâmico; no item 2.2, serão apresentados os conceitos básicos e classificação dos revestimentos cerâmicos; no item 2.3, serão apresentadas as características técnicas dos revestimentos cerâmicos; no item 2.4 serão apresentadas as matérias-primas e no item 2.5 serão apresentados os processos produtivos.

### **2.1 Origens do material cerâmico**

Segundo ANFACER (1994), a origem da cerâmica é imprecisa porque compreende um vastíssimo grupo de produtos nascidos com a civilização primitiva.

Segundo Fonseca, Fernández e Bernardin (199\_), a cerâmica é bastante conhecida e seu domínio remonta sete mil anos na história da humanidade, no Oriente Médio. Foram encontrados na China, Babilônia e Grécia Helênica produtos fabricados de cerâmica vermelha, queimados e mesmo glazurados. Inicialmente utilizaram-se os tijolos de adobe que, apesar de menor durabilidade, apresentavam a vantagem de uma maior trabalhabilidade da argila na execução dos elementos. Os tijolos apresentavam durabilidade e incombustibilidade iguais às das telhas.

A produção de produtos cerâmicos foi evoluindo desde suas origens na China até sua expansão por toda a Europa, sendo uma das mais antigas do mundo. Através dos tempos, a tecnologia de fabricação foi gradativamente ampliada e aperfeiçoada. Por muitos séculos o revestimento cerâmico foi sinônimo de produto luxuoso, usado no piso e parede das casas de pessoas ricas. Neste século, principalmente após a segunda guerra mundial, a produção de cerâmica (lajotas e azulejos) apresentou um desenvolvimento industrial considerável com o



advento de novas técnicas de produção. A possibilidade de produzir em escala industrial baixou os preços e tornou-os acessíveis a grande parte da população.

Na fase inicial desse período, os revestimentos cerâmicos foram usados principalmente para satisfazer necessidades funcionais, tais como higiene e facilidade de limpeza, e, desse modo, empregados em banheiros e cozinhas.

A indústria cerâmica evoluiu rapidamente, desenvolvendo novos materiais que ampliam consideravelmente os desenhos, cores e texturas de revestimentos disponíveis no mercado. Como resultado, a cerâmica está conquistando cada vez mais espaços na arquitetura brasileira. Graças à durabilidade, facilidade de manutenção e limpeza, beleza e componibilidade de peças, os materiais cerâmicos gradualmente vêm ganhando os espaços nobres das edificações, como salas de estar, *hall* de entrada e quartos de dormir. Além disso, os materiais cerâmicos vêm sendo usados em fachadas e em áreas internas e externas de ambientes públicos, comerciais e industriais.

Segundo ANFACER (1994), qualidade, tecnologia e competitividade têm garantido ao Brasil a posição de terceiro maior fabricante de produtos cerâmicos do mundo, com pequena margem atrás da Espanha. A Itália continua em primeiro lugar. Eventualmente, considerando a produção chinesa, da qual não se possui dados confiáveis, a produção desses três países ficaria atrás da produção chinesa.

Segundo Fabre (1996), a indústria cerâmica tem lutado para manter e ampliar seu espaço tanto interna quanto externamente. O setor exporta aproximadamente 20 % da sua produção para os Estados Unidos, Canadá e Europa. Estes três mercados tradicionalmente compram produtos italianos ou espanhóis. Esses compradores exigentes consideram o padrão dos produtos brasileiros compatíveis com os produtos dos mercados europeus. São compradores exigentes que não levam em conta unicamente o fator preço. Eles consideram sobretudo a questão qualidade, aliada às possibilidades estéticas que os produtos oferecem. Em geral, os fabricantes entendem que o Brasil faz um produto nas mesmas condições dos produtos internacionais dos países mencionados, pois dispõe de matérias-primas de qualidade superior em jazidas maiores e mais abundantes.

A indústria cerâmica, cada vez mais, está se conscientizando da necessidade de adoção de normas internacionais para melhor atender o mercado de exportação.

## 2.2 Conceitos básicos e classificação

Segundo o dicionário Aurélio (Ferreira, 1975), cerâmica é um substantivo feminino do adjetivo grego *Keramikós*, de *Kéramos* (barro): arte de fabricar vasos de barro e outros artefatos dessa matéria-prima.

Materiais cerâmicos podem ser definidos como qualquer produto, possuidor de uma forma, composto por matérias primas inorgânicas (sejam essas minerais ou artificiais), que de um estado de pó é transformado por meio de queima num objeto sólido, possuindo estrutura parcialmente cristalina e parcialmente vítrea.

Materiais cerâmicos são inorgânicos e não metálicos. Abrangem uma grande variedade de estruturas naturais e sintéticas tais como vidros, tijolos, pedras, concretos, abrasivos, vidrados para porcelana, isolantes dielétricos, materiais magnéticos não-metálicos, refratários para alta temperatura e muitos outros.

Até os anos 40, os materiais cerâmicos mais importantes constituíam a cerâmica tradicional. A matéria prima principal desses materiais cerâmicos é a argila. Produtos considerados como cerâmica tradicional são porcelanas, porcelana chinesa, telhas, vidros, etc.. Desde então, ocorreram significativos progressos no conhecimento das características fundamentais desses materiais e dos fenômenos envolvidos que garantem as características típicas desses materiais. Consequentemente, uma nova geração desses materiais foi desenvolvida, e o termo cerâmico ficou muito mais abrangente. Esses novos materiais chamados de cerâmicos de alta tecnologia são, por exemplo, supercondutores, peças usadas na eletrônica, na computação, nos sistemas de comunicação, nas aeronaves espaciais.

Em essência, o processamento dos materiais de alta tecnologia não difere do da cerâmica tradicional. No entanto, a matéria-prima e as condições de fabricação são controladas com maior rigor para alcançar determinadas propriedades exigidas dependendo da aplicação da peça.

Os materiais cerâmicos convencionais podem ser classificados, em função de sua superfície, em esmaltados ou não esmaltados, e dentro dessas duas famílias principais, de acordo com o processo de conformação utilizado, em extrudados ou prensados. Podem ainda ser classificados em função do tipo de tratamento térmico, em biqueima ou monoqueima. Além dessa subdivisão, estritamente ligada ao processo de fabricação utilizado, a cerâmica é



classificada de acordo com suas características de absorção de água, mediante uma denominação tipológica de uso comercial, tal como grês porcelanato, poroso, etc.

Segundo Zandonadi (1993), uma das formas de classificar os produtos cerâmicos é em relação à aplicação final destes. Assim, define-se como cerâmicos avançados, as pastilhas de corte e os sensores de oxigênio, entre outros; como cerâmicos estruturais ou cerâmica vermelha, o tijolo e a telha; como cerâmica branca, a louça e as peças de sanitário, e por último, como cerâmica de revestimento e pavimento, os azulejos e pisos.

Segundo ANFACER (1994), pode-se dividir os produtos cerâmicos em terracota, grês e porcelana. Terracota é nome dado ao grupo de produtos cerâmicos cozidos, porosos e sem vidrado, ao qual pertencem o tijolo, a telha, a louça e a manilha de barro, a argila expandida, o ladrilho cerâmico, entre outros. Grês é o nome dado ao produto cerâmico impermeável, obtido por cocção entre 1250 a 1300 graus centígrados, de uma pasta vitrificável, natural ou artificialmente preparada, cujas características finais mais importantes são: massa opaca de som metálico, sem brilho, não riscável por ponta de aço e de dureza pétrea e que tem por representantes o grês sanitário, grês arquitetônico, artefatos de grês de cozinha, mesa e decoração caseira, tubos e conexões, ladrilhos, mosaico cerâmico e artefatos para indústrias químicas. Porcelana é o nome dado ao produto cerâmico impermeável, obtido por cocção de uma pasta vitrificável de caulim (componente plástico), quartzo (componente desengordurante) e feldspato (fundente) e cujas características são: massa translúcida, dureza pétrea, som metálico e vitrificação mais intensa do que a do grês.

Segundo Henrique (1997), o grês porcelanato é o nome dado ao revestimento cerâmico que apresenta elevada resistência e baixíssima absorção de água. Ele é obtido a partir de matérias-primas de grande pureza (mínimas quantidades de matérias orgânicas) e submetido a um tratamento térmico de aproximadamente 1250°C. Como resultado, obtém-se um produto compacto, homogêneo, denso, sem esmalte e totalmente gresificado. O grês porcelanato difere de um revestimento tradicional por não possuir a camada de esmalte, isto é, o produto é homogêneo em todo o seu corpo, tanto na cor quando nas suas características técnicas. No processo de fabricação do grês porcelanato, as características finais do produto já começam a ser definidas na preparação de massa. Nesta etapa, a adição de corantes na composição da massa determina a cor ou cores do produto final. Em função do efeito que se deseja produzir são misturadas massas de diversas cores. Outra diferença significativa no grês porcelanato é a possibilidade de efetuar o polimento, processo que gera um brilho semelhante ao da pedra natural. O grês porcelanato é um produto que tem o seu desempenho comparado

com o das pedras naturais e não com um produto esmaltado. Em relação às pedras naturais, o grês possui uma resistência à abrasão até três vezes maior, é mais resistente a ácidos, álcalis, manchas e a solicitações mecânicas. Possui uma grande variedade de cores uniformes, sendo indicado para ambientes de alto tráfego.

Segundo Palmonari e Timellini (1989), os revestimentos cerâmicos podem ser classificados em diferentes tipos de produto como é descrito na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Classificação dos revestimentos cerâmicos conforme o tipo de produto.

	<b>Tipo</b>	<b>Absorção d'água (%)</b>	<b>Método de conformação</b>	<b>Uso</b>
<b>Esmaltados</b>	Majólica	15-25	Modelagem	Parede (interno)
	Cotoforte	4-15	Modelagem	Piso (interno)
	Semi-grês	0-6	Modelagem	Piso (interno e externo)
	Monoqueima	0-12	Modelagem	Piso (interno e externo)
	Monoporosa	6-25	Modelagem	Parede (interno)
	<i>Klinker</i>	0-7	Extrusão	Parede (externo); piso (interno e externo)
<b>Não-esmaltados</b>	Coto	3 - 15	Extrusão	Parede (interno)
	Lajota	0 - 4	Modelagem	Piso (interno e externo)
	Grês porcelanato	0 - 0,5	Modelagem	Parede (externo); piso (interno/externo)
	<i>Klinker</i>	0 - 7	Extrusão	Parede (externo); piso (interno/externo)

Segundo Palmonari e Timellini (1989), existem vários defeitos em revestimentos cerâmicos que podem ser atribuídos não à escolha de um revestimento de pouca qualidade, mas a uma má escolha do tipo de revestimento. A seleção correta do tipo de revestimento necessariamente envolve o conhecimento do material “revestimento cerâmico”. Isso inclui suas características técnicas, suas propriedades de interesse e suas limitações. O conhecimento das características técnicas, em particular, pode constituir a base para uma escolha correta do tipo de revestimento, mas não participa dos critérios estéticos e decorativos.



## 2.3 Características técnicas dos revestimentos cerâmicos

Segundo ANFACER (1994), as características técnicas dos revestimentos cerâmicos são:

### 2.3.1 Absorção de água

A absorção d'água permite calcular a porosidade dos corpos cerâmicos tanto no que diz respeito ao número de poros como o tipo da porosidade (aberta ou fechada). Alta absorção d'água indica uma estrutura porosa aberta, enquanto baixos valores desse parâmetro (para limites tendendo a zero) indicam estruturas cada vez mais compactas ou de porosidade fechada. Geralmente, menores valores de absorção d'água correspondem a melhor performance do revestimento no que diz respeito à resistência mecânica, à dureza, à resistência a ácidos e ao frio. Materiais compactos e sinterizados apresentam uma estrutura com baixa absorção de água, como por exemplo, a porcelana e o grês porcelanato.

Muitas das características físicas e químicas dos revestimentos cerâmicos dependem da sua porosidade, razão pela qual foi escolhida a absorção de água, expressa em porcentagem, como parâmetro de classificação das normas mundiais (ISO 13006 = especificações; ISO 10545 = ensaios). A classificação seguindo o critério de absorção de água e conformação pode ser vista na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Classificação dos materiais cerâmicos conforme a absorção de água e conformação.

<b>Conformação Absorção de água</b>	<b>A Extrudado ou marombado</b>	<b>B Prensado</b>	<b>C Outros processos de conformação</b>
Grupo I $a \leq 3\%$	AI $0,5\% < a \leq 3\%$ BIb	$a \leq 0,5\%$ BIa	CI
Grupo IIa $3\% \leq a \leq 6\%$	AIa	BIa	CIa
Grupo IIb $6\% \leq a \leq 10\%$	AIb	BIb	CIb
Grupo III $a \geq 10\%$	AIII	BIII	CIII

## **2.3.2 Características dimensionais**

O revestimento cerâmico é um elemento constituinte que é colocado modularmente em extensas superfícies de chão ou parede. A qualidade e o valor de uma superfície revestida está diretamente relacionada à regularidade e à uniformidade dos componentes individuais; isto é, o revestimento individual define a qualidade superficial e as dimensões. Por essa razão, todas as diferenças e irregularidades dimensionais que, em algum momento, alteram ou prejudicam a harmonia do revestimento são consideradas defeitos (Palmonari e Timellini, 1989).

As características dimensionais importantes para a cerâmica de revestimentos são: espessura, curvatura, retangularidade, empenamento e paralelismo.

As normas técnicas controlam a tolerância da dimensão dos lados, medidos e agrupados em faixas chamadas calibres. A norma técnica também fornece limites máximos para fora de esquadro, curvatura, empenamento e espessura. A curvatura refere-se aos lados e diagonais. O empenamento refere-se ao desvio de um vértice em relação ao plano formado pelos outros três.

## **2.3.3 Resistência mecânica**

### **2.3.3.1 Resistência à flexão**

Existem duas formas de avaliar a resistência à flexão. A primeira é intrínseca ao material e é chamada de módulo de ruptura. O módulo de ruptura é uma característica de cada material e corresponde à tensão máxima por unidade de área que um corpo-de-prova pode resistir sem romper quando estiver sujeito a um acréscimo de carga. O módulo de ruptura é uma propriedade mecânica que permite ótimo controle de qualidade dos revestimentos cerâmicos em função de sua aplicação. O módulo de resistência à flexão, determinado conforme método normalizado, é expresso em  $\text{N/mm}^2$ .

A segunda é chamada de carga de ruptura da peça, que depende da resistência intrínseca e da espessura da peça. Para as peças de revestimento de paredes não são necessárias altas cargas de ruptura. No entanto, esta característica é muito importante para as peças de pavimento.

#### **2.3.3.2 Resistência ao impacto**

É a resistência à fragmentação da superfície, resultante de uma colisão (batida). O uso de revestimento cerâmico, especialmente esmaltado, requer cuidados por parte do usuário, evitando a queda de pesos e de objetos pontiagudos. É uma característica muito importante em locais onde circulam cargas pesadas, tais como empilhadeiras, carrinhos industriais, etc.

#### **2.3.3.3 Resistência à compressão**

De forma geral, pode-se dizer que materiais de baixa porosidade apresentam boa resistência à compressão, desde que perfeitamente assentados.

#### **2.3.3.4 Resistência à abrasão**

Muitas vezes, os revestimentos cerâmicos são submetidos a condições de tráfego intenso, ou de contato com objetos que possam ocasionar desgaste em suas superfícies. A propriedade mecânica que representa a resistência de um revestimento cerâmico ao desgaste de superfície causado pelo movimento de pessoas e objetos é denominada resistência à abrasão.

Existem dois métodos de avaliar a resistência à abrasão: para produtos esmaltados e para não esmaltados.

Para produtos esmaltados, o método *Porcelain Enamel Institute* (PEI) prevê a utilização de um aparelho que provoca a abrasão por meio de esferas de aço e material abrasivo. O resultado é usado como base para uma classificação em grupos, como pode ser visto na Tabela 2.3.



Tabela 2.3 Classificação dos materiais cerâmicos conforme a resistência à abrasão.

Abrasão	Resistência	Tipo de ambiente
Grupo 0		Desaconselhável para piso
Grupo 1 (PEI-1)	Baixa	Banheiros residenciais, quartos de dormir
Grupo 2 (PEI-2)	Média	Quartos sem portas para fora
Grupo 3 (PEI-3)	Média alta	Cozinhas residenciais, corredores, hall de residências, quintais.
Grupo 4 (PEI-4)	Alta	Estabelecimentos comerciais, internos, entradas hotéis, show rooms, salões de venda
Grupo 5 (PEI-5)	Altíssima e sem encardido	Áreas públicas, shopping centers, aeroportos, padarias, fast-foods, etc.

Para os não-esmaltados, a resistência à abrasão é avaliada medindo o volume de material removido da superfície da peça quando submetida à ação de um disco rotativo e um material abrasivo específico.

Os elementos adicionados aos esmaltes ou às massas cerâmicas que possibilitam um aumento dessa propriedade, normalmente acarretam na perda de propriedades estéticas do produto. Torna-se, portanto, necessário classificar o revestimento em classes de utilização, de modo que, quanto maior for o tráfego, maior será a resistência exigida.

### 2.3.4 Dilatação

As dilatações podem ser de dois tipos: reversíveis, por variação de temperatura; irreversíveis, por expansão por umidade. Ambas precisam ser absorvidas pelas juntas largas e pelos rejuntamentos flexíveis.

#### 2.3.4.1 Dilatação térmica

A dilatação térmica linear pode ser definida como a variação dimensional apresentada por todos os materiais quando submetidos a um aumento de temperatura. É importante considerar a dilatação térmica de revestimentos cerâmicos com outros materiais da



construção civil, principalmente os destinados a áreas externas. Ela também é importante nas lareiras, ao redor de churrasqueiras ou fogões, etc.

Esta característica é medida com um aparelho de precisão e o resultado significa o valor em microns por metro por grau centígrado que o material aumenta por metro do tamanho inicial, quando aquecido a determinada temperatura.

#### **2.3.4.2 Dilatação por expansão por umidade**

Esta característica é medida e expressa em mm/m e pode ser muito baixa, quando a queima e a formulação estão bem feitas. Produtos cerâmicos mal queimados tendem a apresentar maior expansão por umidade e este fenômeno pode ser uma das causas do estufamento e da gretagem. Este fator é crítico em ambientes úmidos, tais como piscinas, fachadas, saunas, estações de metrô.

### **2.3.5 Resistência ao gretamento**

O termo gretamento refere-se a pequenas rachaduras ou fissuras que se situam na superfície do vidrado cerâmico de modo circular ou irregular. A causa desse defeito é normalmente a falta de compatibilidade entre o coeficiente de expansão térmica da base cerâmica e do vidrado. Se as tensões internas provenientes da diferença desses coeficientes tornarem-se maior que a resistência mecânica pontual do vidrado, o mesmo não resistirá ao gretamento.

A tendência à gretagem é medida em laboratório, submetendo a peça cerâmica a uma pressão de vapor de 7 atmosferas por uma hora. Este teste acelerado reproduz a expansão por umidade que a peça sofrerá ao longo dos anos depois de assentada.

### **2.3.6 Resistência ao gelo**

Esta característica é importante em revestimentos destinados à terraços, fachadas e sacadas em cidades frias e câmaras frigoríficas, ou seja, locais sujeitos a temperaturas inferiores a 0 °C.

O comportamento ao gelo está diretamente relacionado com a porosidade aberta, ou seja, com a presença de poros no interior das partículas por onde pode ocorrer a entrada de umidade presente no ambiente. O dano é provocado pelo fato da água congelada nos poros da

peça aumentar de volume e, conseqüentemente, tensionar a peça. Os materiais que não resistem ao gelo podem trincar ou até romper em uso.

Os materiais de baixa absorção, como por exemplo, o grês porcelanato, são mais resistentes ao gelo, sendo portanto adequados em qualquer condição de uso.

### 2.3.7 Resistência ao ataque químico e a manchas

Resistência ao ataque químico é a capacidade que a superfície cerâmica tem de não alterar sua aparência quando em contato com determinados produtos químicos ou agentes manchantes, padronizados.

O resultado do teste permite alocar o produto numa classe de resistência, para cada agente manchante ou para cada produto químico especificado na norma.

As classes, em ordem decrescente de resistência ao ataque químico, são as seguintes: A, B, C, sendo que a classe A apresenta ótima resistência a produtos químicos e a classe C apresenta baixa resistência a produtos químicos.

Na Tabela 2.4, apresenta-se a classificação dos revestimentos cerâmicos conforme sua resistência a manchas e conseqüente facilidade de limpeza.

Tabela 2.4 Classificação dos materiais cerâmicos conforme a facilidade de limpeza.

Classes	Facilidade de limpeza
Classe 5	Fácil
Classe 4	Com produto de limpeza fraco
Classe 3	Com sistema mecânico e produto de limpeza forte
Classe 2	Com solventes
Classe 1	Impossível

Uma das características de qualidade mais importantes dos revestimentos cerâmicos é a resistência a manchas. Essa característica de qualidade é prejudicada quando a superfície é polida com o objetivo de melhorar as características estéticas do produto. Com isto, obtêm-se superfícies lisas e muito brilhantes, ao passo que alguns dos poros fechados que se encontram distribuídos no interior da peça são expostos sobre a superfície, ocasionando uma degradação da resistência a manchas do produto final.



### **2.3.8 Higiene**

A higiene é uma das grandes vantagens dos revestimentos cerâmicos sobre os outros existentes no mercado. Sua superfície vitrificada não retém nenhum líquido, não absorve vapores, fumaças, cheiros, tampouco qualquer tipo de pó. O pó se assenta sem fenômenos de aderência, ao contrário do que acontece com carpetes ou materiais plásticos, que absorvem pó devido à carga eletrostática provocada pelo próprio atrito gerado durante o uso.

O revestimento cerâmico traz enormes benefícios quanto à infecção hospitalar e alergias e por isso são recomendados em hospitais, ambulatórios, prontos-socorros, quartos de crianças, escolas, centros comunitários, restaurantes, banheiros e cozinhas.

### **2.3.9 Resistência ao choque térmico**

O termo choque térmico refere-se à tensão que a peça cerâmica sofre quando submetida a bruscas variações de temperatura. Resistência ao choque térmico indica se o revestimento é capaz de resistir às variações bruscas de temperatura sem apresentar danos. Essa característica é importante em revestimentos de fachadas e *box* de banheiros, por exemplo, onde as variações podem chegar até 70 °C.

A norma internacional ISO prevê que as peças devem resistir a uma variação brusca de 80 °C.

### **2.3.10 Estabilidade de cores**

Os materiais cerâmicos não alteram suas cores quando expostos à luz, mesmo por períodos prolongado. Eles são estáveis à luz e resistentes à deterioração. Esta característica é muito importante em pisos e paredes em áreas externas sujeitas à longa exposição ao sol.

### **2.3.11 Comportamento ao fogo**

O comportamento ao fogo dos materiais cerâmicos pode ser avaliado com base em três critérios: resistência à ação destrutiva da chama, possibilidade de contribuir na difusão da chama e na emissão de fumaça e substâncias tóxicas.

A cerâmica, se comparada com outros materiais de revestimentos, proporciona imediato e real controle da prevenção de incêndio, por ser incombustível, com capacidade de inibição de chama.

No caso de incêndio, a cerâmica não produz fumaças ou gases tóxicos, que são a principal causa de mortes. Além disso, o material cerâmico não se altera em contato com o fogo.

### **2.3.12 Escorregamento**

O escorregamento sobre uma superfície é a característica que descreve as condições cinéticas do movimento de um corpo em contato com a mesma.

No caso de pisos, é evidente o quanto o escorregamento está relacionado a segurança no caminhar.

O parâmetro utilizado para caracterizar o escorregamento de uma superfície é o coeficiente de atrito. A aspereza pode ser natural ou especificamente criada através de várias formas de relevo. Superfícies deste tipo possuem coeficiente de atrito relativamente alto, mesmo em presença de água ou óleo.

Vale ressaltar que, superfícies com ranhuras ou outros tipos de relevo, que fornecem condições ótimas de segurança em relação a quedas e escorregamento são mais difíceis de limpar.

## **2.4 Matérias-primas**

Segundo ANFACER (1994), as matérias-primas para revestimento cerâmicos são naturais, sendo de dois tipos: argilosas e não-argilosas. Para os esmaltes, utilizam-se também matérias-primas não naturais.

As matérias-primas argilosas apresentam grande variedade de tipos de composição. Os principais componentes mineralógicos das argilas são a caulinita, illita, clorita e montmorilonita. As placas de cerâmica mais elaboradas têm em sua composição de 30% a 50% de matérias-primas argilosas. Elas conferem trabalhabilidade (conformação) e resistência mecânica a cru.



As matérias-primas não argilosas servem por exemplo, para controlar a plasticidade da massa cerâmica (quartzo), auxiliar na sinterização (feldspato, filito) e controlar a contração na queima (carbonato de cálcio e magnésio), entre outros.

As matérias-primas não naturais são utilizadas para a preparação de esmaltes e corantes. Entre esses, pode-se citar: compostos de chumbo, boro, zircônio e titânio, óxidos metálicos diversos (de magnésio, ferro, cádmio, cromo, zinco, etc.

Segundo ACIMAC (1998), uma massa tradicional é composta por:

- a) materiais argilosos, que dão suficiente plasticidade para se obter uma forma definida; contêm alumínio, silício e traços de cálcio, ferro e titânio;
- b) materiais fundentes, como feldspato, nefelina, etc., que produzem, por queima, fases vítreas que agem como aglutinante entre as partículas e promovem as reações sólido-sólido; contêm sódio, magnésio e silício;
- c) outros materiais inertes como talco, sílica, pirofilito, etc., que servem para obter qualidades particulares; possuem como constituintes principalmente cálcio, magnésio e silício;
- d) aditivos, que servem principalmente para melhorar a reologia da suspensões aquosas, podendo ser inorgânicos e orgânicos; são introduzidos na massa em quantidades muito pequenas (<1%).

## 2.5 Processos produtivos

Para Hengler (1998), no caso de revestimentos esmaltados (vitrificados), duas diferentes seqüências tecnológicas são possíveis após a conformação do suporte cerâmico: uma, baseada no processo de biqueima, e outra, no processo de monoqueima (Figura 2.1).

No primeiro caso, monoqueima, o esmalte é aplicado sobre suporte seco já engobado e, após, em uma só etapa de queima, sinteriza o suporte e estabiliza o vidrado ao mesmo tempo. Deve-se ter em conta desde o início, o tipo de matérias-primas utilizadas na massa e a técnica de esmaltação.

No segundo caso, biqueima, os revestimentos pré-secos são queimados e, posteriormente, o engobe, os esmaltes e a decoração são aplicados na superfície do chamado suporte ou biscoito; o ciclo é concluído com uma segunda queima cuja função é estabilizar o vidrado, impermeabilizando a superfície da peça final.

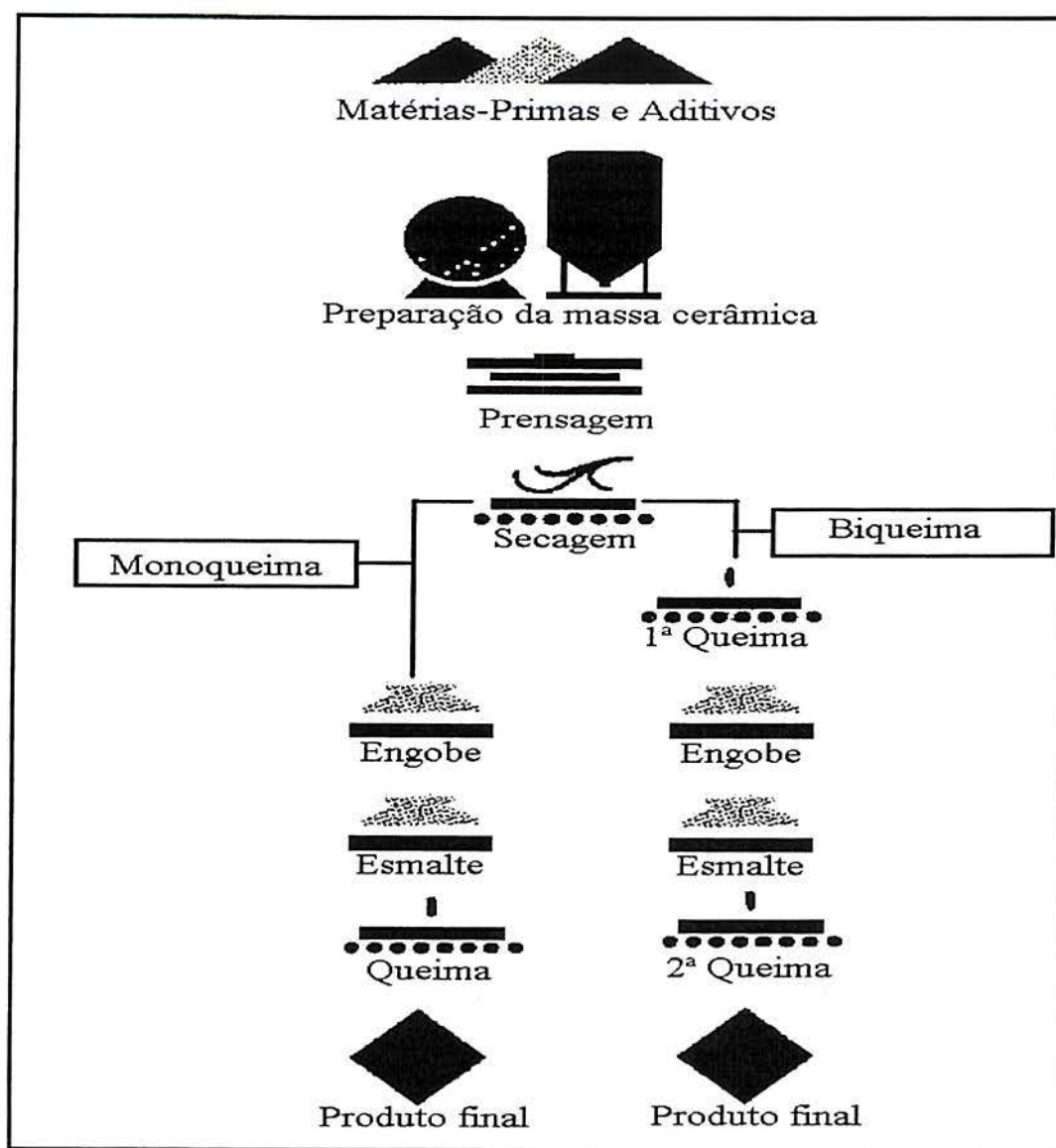


Figura 2.1 Fluxogramas dos processos de produção de revestimentos cerâmicos (Barba *et alli*, 1997).

É possível produzir revestimentos cerâmicos com diferentes tecnologias (monoqueima ou biqueima), começando com diferentes matérias-primas (por exemplo: argilas que queimam com cor branca ou vermelha), com diferentes soluções tecnológicas para cada fase da produção (conformação por modelagem ou extrusão), com diferentes parâmetros operacionais das máquinas e equipamentos. Para maiores informações sobre os processos produtivos, ver por exemplo, Kingery, (1960), GMBH (1979), Didier (1983), Perez (1983), Callister (19\_\_ ) e Siti (1997).



## 2.5.1 Preparação das matérias-primas: moagem

A preparação das matérias-primas consiste em uma série de operações objetivando a obtenção de um material de composição homogênea (massa), com uma distribuição granulométrica e forma de grãos apropriada.

Segundo ANFACER (1994), os processos de preparação das matérias-primas para a massa podem ser de dois tipos: a úmido e a seco. No processo úmido, as matérias-primas são misturadas com água em moinhos de bolas que giram por um tempo necessário até a obtenção de partículas com tamanhos controlados. Essa mistura, com cerca de 35% de água (barbotina) é pulverizada e secada (*spray drier*) a mais ou menos 7 % de umidade e com determinada distribuição granulométrica. No processo a seco, as matérias-primas, isentas de água, são moídas em moinhos do tipo martelo, cone, etc., até a dimensão desejada, e posteriormente umidificadas até mais ou menos 9%.

## 2.5.2 Conformação

A conformação de produtos cerâmicos pode ser feita de três formas: modelagem (prensagem), moldagem hidrolástica e colagem. A moldagem hidrolástica inclui a extrusão e moldagem manual, entre outros.

### 2.5.2.1 Vantagens da modelagem (prensagem)

Segundo Henrique (1997), dentre as formas citadas anteriormente, a modelagem é mais utilizada, pois apresenta as seguintes vantagens:

- a) alta resistência mecânica a cru: devido ao emprego de pressões que podem variar de 25 a 50 MPa na conformação da peça;
- b) alta produtividade: com a modelagem consegue-se grande produção horária, com emprego mínimo de mão-de-obra, e ainda pela facilidade de automotivação das fases e a transferência das peças;
- c) facilidade de secagem: é muito evidente principalmente no caso da modelagem a seco e semi-seco;
- d) facilidade de se obter diferentes produtos: infinitas dimensões e formas exatas;
- e) mínima deformação nas operações sucessivas à modelagem: secagem, esmaltação e queima;

f) redução da retração: com o empacotamento das partículas da massa, reduz-se os vazios e a retração que pode ocorrer na secagem e queima.

### **2.5.2.2 Tipos de modelagem**

Segundo Henrique (1997), a modelagem pode ser classificada segundo o seu grau de umidade em:

a) modelagem plástica: a mistura apresenta um percentual de água de 20%-25%; utiliza-se estampos de gesso cimentado na matriz de ferro fundido.

b) modelagem semi-plástica: a mistura apresenta um percentual de água de 15%-20%; utiliza-se estampos metálicos com superfícies muito lisas.

c) modelagem semi-seco: o pó apresenta uma umidade de 10%-15%.

d) modelagem a seco: o pó apresenta uma umidade que vai de 0%-10%.

No caso da modelagem plástica e semi-plástica, a composição vem introduzida nos estampos sob a forma de misturas. Na modelagem a seco e semi-seco a composição vem introduzida sob a forma de pó de diversas formas, com partículas mais ou menos finas, tornando uma boa ou discreta granulometria escorregadia segundo o tipo de preparação.

Na modelagem plástica (20%-25% de água), empregam-se moldes de gesso, constituídos por duas peças de gesso que correspondem à metade superior e inferior do produto à fabricar. A consistência da peça obtida deve-se mais ao poder ligante da mistura que à pressão aplicada. Em alguns casos trabalha-se com umidade da ordem de 15%; para estes casos os moldes utilizados são metálicos e necessitam de uma lubrificação contínua para impedir que a mistura adira ao molde. Para pós secos, com umidade na ordem de 7%, utiliza-se moldes metálicos.

Na modelagem, além da umidade da peça, também são muito importantes a granulometria da amostra, a pressão aplicada e a relação espessura/comprimento da peça desejada.

Os efeitos derivados da força da pressão aplicada são a diminuição do tamanho dos poros, e um melhor contato entre partículas e a fratura das partículas no ponto de contato.

Em geral, admite-se que ao aumentar a pressão aplicada, aumenta-se a densidade ao verde, diminui-se a contração e aumenta-se a densidade no queimado.



As indústrias de pavimento e revestimento cerâmicos utilizam predominantemente o prensado à seco pois: a) facilita a secagem das peças, eliminando-se praticamente a contração e obtendo-se peças com uma grande exatidão dimensional e b) apresenta maior produtividade.

### **2.5.2.3 Fases da modelagem**

Segundo Henrique (1997), a modelagem é composta por três fases:

a) formação da massa: no sentido de dar à matéria-prima, inicialmente sem forma própria, uma geometria bem definida e adequada;

b) compactação da massa: no sentido de dar consistência à matéria-prima, resistência a cru e em queimado a todas as solicitações mecânicas, químico-físicas a que o material é exposto;

c) adensamento: no sentido de limitar os vazios existentes entre as partículas de massa;

Os principais objetivos da operação de modelagem são:

a) moldar as peças com a geometria e dimensões preestabelecidas para que estas não apresentem à cru ou queimado aqueles defeitos que são diretamente originados pela incorreta realização desta operação.

b) contribuir na configuração de uma microestrutura na peça crua que cumpra os seguintes requisitos:

- proporcionar à peça depois de seca a resistência mecânica suficiente para seu processamento a cru (esmaltação, transporte, armazenamento e alimentação ao forno);

- conferir à peça durante a etapa de pré-aquecimento da queima, a permeabilidade necessária para que todas as reações vinculadas a uma transferência de matéria (desidratação, oxidação da matéria orgânica, decomposição de carbonatos, etc.) sejam completas no ciclo previsto;

- alcançar no produto queimado as propriedades características requeridas (baixa contração linear e absorção de água, elevada resistência mecânica, planaridade, etc.) com os ciclos de queima empregados.

### **2.5.2.4 Variáveis de processo**

Segundo Henrique (1997), os fatores que podem influir na operação de modelagem são: a) ciclo de modelagem ou programa de compactação e a características do pó que se

prensa. O programa de compactação compreende o conjunto de ações sincronizadas que intervêm nas distintas etapas do prensado. As variáveis fundamentais da operação, que a princípio devem ser consideradas na descrição do programa de compactação e que afetam a qualidade do produto prensado, podem ser agrupadas nos seguintes grupos: fatores que intervêm no enchimento da cavidade, primeiro ciclo de modelagem, período de desaeração, segundo ciclo de modelagem e extração.

Os controles na operação de modelagem podem se dividir em dois grandes grupos: controles externos, do *input* e do *output* e controles na máquina.

Na modelagem, o *input* é o aglomerado obtido no processo de atomização (se a massa for obtida por via úmida) ou o pó obtido por moagem em moinhos pendulares (via seca). Os principais controles a serem efetuados são o controle da umidade e da granulometria.

O *output* é, logicamente, a peça conformada e com um percentual de umidade que deverá ser eliminado (secagem) para sua posterior queima. Os controles que interessam nesta peça são: resistência mecânica, compactação, distribuição de compactação e defeitos, que podem ser visíveis ou não.

Na prensa pode-se distinguir para seu estudo, dois tipos de controles: aqueles que afetam o processo de modelagem propriamente dito e um grande grupo de controles que afetam o sincronismo da máquina ou o ciclo de modelagem.

#### **2.5.2.5 Defeitos de modelagem**

Os principais defeitos originados na fase de modelagem são: reprensados, fora de esquadro, rebarbas e serrilhas, perebas (sujeira de estampo), luneta, calibres (bitolas diferentes), diferenças de porosidade, trincas e quebras, esfolhados, pontas quebradas, peças fracas, gotas de óleo, diferenças de espessura e peso.

A seguir apresenta-se a definição de cada defeito, segundo Henrique (1997).

a) reprensados: este defeito refere-se a zonas de uma mesma peça que apresentam maior compactação porque a carga é excessiva; pode ser produzido por grumos de maior umidade, crostas das paredes do silo, etc. Para prevenir este defeito é necessário realizar a conservação e limpeza dos silos, peneiras, etc.



b) fora de esquadro: uma diferença de compactação pode gerar, a uma determinada temperatura de queima, diferenças na contração linear da peça; trata-se de um defeito que se apresenta preferencialmente em peças de grês porcelanato.

c) rebarbas e serrilhas: chamam-se rebarbas as películas finas de material prensado que aparecem de vez em quando na borda das peças; as rebarbas têm sua origem na folga excessiva que pode existir entre o punção e a matriz do estampo, seja por desgaste ou por aquecimento deficiente; as serrilhas aparecem freqüentemente no lado liso da peça; consistem na aparição de dentes de serra nas bordas do material prensado; estes defeitos ocorrem quando o estampo começa a desgastar pelo uso; é conveniente portanto, controlar o número de golpes dados e proceder sua troca quando alcança-se um número preestabelecido.

d) perebas (sujeira de estampo): trata-se de porções de massa grudadas no lado liso da peça e que provocam relevos na mesma; para evitar este defeito, deve-se controlar perfeitamente a limpeza dos estampos assim como o aquecimento dos pratos e matriz.

e) luneta: trata-se da curvatura, tanto em direção ao interior como ao exterior da peça, podendo-se verificar em um só lado ou nos dois lados da peça; é um defeito que pode se apresentar indistintamente em material gresificado ou poroso; no caso de materiais gresificados, trata-se de diferenças de compactação causadas por má distribuição do pó nos estampos (defeito similar ao fora de esquadro).

f) calibres (bitolas diferentes): trata-se de diferenças de medidas na produção habitual; em primeiro lugar, deve-se verificar se as diferentes bitolas coincidem com as diferentes cavidades da prensa, ou seja, se cada cavidade resulta uma bitola de diferente medida após a queima; deve-se, portanto, controlar estritamente a operação de modelagem mantendo suas variáveis (pressão, umidade, granulometria) entre limites aceitáveis e previamente determinados.

g) diferenças de porosidade: são também devidas a diferenças de compactação (em igualdade com outras variáveis do processo) e virão acompanhadas de fora de esquadro e/ou lunetas se ocorrerem na mesma peça, ou de bitolas diferentes se ocorrerem em peças diferentes.

h) trincas e quebras: a maioria aparecem depois da queima, não sendo muitas vezes visíveis a olho nu antes da queima; podem ser devido a zonas fracas causadas por uma composição deficiente da massa ou também por pequenos golpes durante o processo (guias, espaçadores, entrada e saída do secador, máquina de carga, etc.). As trincas podem ser detectadas utilizando-se querosene nas peças na saída do secador.

i) esfolhado: este defeito consiste na presença de ar ocluso no interior da peça; deve-se a uma má desaeração na modelagem; corrige-se aumentando ligeiramente o tempo de desaeração.

j) pontas quebradas: trata-se de peças com bordas quebradas, geralmente por pequenos golpes na linha de produção; se os estampos estão muito desgastados, as peças serão mais fracas nos cantos, facilitando este defeito.

k) peças fracas: trata-se de peças com uma resistência mecânica muito baixa e que, portanto, rompem-se com grande facilidade no transporte; este defeito ocorrerá por repentinos decréscimos de umidade do pó.

l) coração negro: não se trata de um defeito propriamente de modelagem, mas pode ser comprovado ou solucionado nas prensas; mesmo estando corretas a composição da massa e as variáveis de queima, o coração negro pode aparecer por um excesso de pressão ou de umidade, ou por uma atmosfera extremamente redutora na queima da peça.

m) gotas de óleo: nos processo de monoqueima em ciclo rápido, normalmente utilizam-se prensas hidráulicas; qualquer fuga de óleo do circuito hidráulico da prensa que se misture com o pó de modelagem originará durante a queima, empolamento na peça causado pela carbonização ou parcial combustão do óleo.

n) diferenças de espessura e peso: podem ocorrer diferenças de espessura numa mesma peça devido a uma distribuição incorreta do pó no estampo ou também por defeitos de fabricação ou montagem dos mesmos. Se as diferenças de espessura ocorrerem entre peças diferentes acarretarão também diferenças no peso.

### **2.5.3 Secagem**

Em termos gerais, entende-se por secagem a operação de eliminar um líquido de uma substância que o contém.

Segundo ANFACER (1994), a secagem atual, na maioria das fábricas, é feita em secadores a gás (GLP, gás natural, gasolina, gás de carvão, etc.) verticais ou horizontais, de ciclos longos, que tendem a ser substituídos pelos processos rápidos.

Na maior parte dos secadores, a secagem dos materiais cerâmicos se efetua mediante a circulação de ar quente. O ar serve como portador de energia e transporta o vapor de água. Neste tipo de secagem, que pode ser considerada como secagem por convecção, a umidade do



ar apresenta uma grande importância, pois quanto menor a umidade do ar e maior a sua temperatura, maior a quantidade de água que será eliminada dos revestimentos cerâmicos.

### **2.5.3.1 Fases da secagem**

Segundo Henrique (1997), pode-se definir três etapas de secagem:

a) período de indução: trata-se de um período de adaptação do produto às condições nas quais vai ocorrer a secagem.

b) primeira fase de secagem: caracteriza-se por uma velocidade de secagem constante; durante este período, a evaporação não depende das condições externas do ar; neste período a velocidade com que se elimina a água da superfície do sólido é igual a velocidade com que a mesma migra desde o interior do sólido; desta maneira, a superfície do material mantém-se com umidade constante; a temperatura na interface será constante e o calor que chega é empregado integralmente na evaporação do líquido; neste período, a velocidade de secagem é determinada pela velocidade de evaporação.

c) segunda fase de secagem: nesta fase, a quantidade de água que se desloca por capilaridade ou por difusão até a superfície é cada vez menor, razão pela qual a velocidade de evaporação diminui, diminuindo também a velocidade de secagem; quando toda a superfície do sólido fica seca, a secagem continua, dependendo das condições do ar (umidade relativa) e do sólido (natureza e umidade) por um dos seguintes mecanismos: movimentação de uma frente de evaporação que se desloca para o centro do sólido, de maneira que o vapor que se produz é o que se difunde através da massa seca para o exterior e difusão do líquido através da massa sólida e sua evaporação ao chegar à superfície, sendo que a velocidade de secagem dependerá da velocidade de difusão do líquido. Neste período, em qualquer dos casos, a velocidade de secagem depende do conteúdo de umidade do sólido; o final da secagem nas instalações industriais coincide, em muitas ocasiões, com o fim da segunda etapa de secagem, uma vez alcançada a umidade de equilíbrio para as condições de operação.

d) terceira fase de secagem: a terceira fase de secagem está caracterizada pela expulsão da umidade restante; a velocidade de secagem diminui até valores próximos a zero.

### **2.5.3.2 Variáveis de processo**

Segundo Henrique (1997), o funcionamento da maior parte dos secadores cerâmicos está baseado no processo de convecção, no qual intervêm diversos fatores importantes:

temperatura do ar, umidade relativa do ar de secagem, velocidade do ar, espessura das peças a secar, permeabilidade do sólido (quantidade e tamanho dos poros).

a) temperatura do ar: o ar de secagem é o portador da energia suficiente para evaporar a água e age como transportador da água que se evapora das peças; o calor necessário para a evaporação da água no período de velocidade de secagem constante é introduzido pelo ar; a velocidade de secagem experimenta um aumento à medida que a temperatura do ar aumenta.

b) umidade relativa do ar: à medida que a umidade relativa do ar aumenta, diminui a velocidade de secagem; um exemplo disto são os secadores ao ar livre, nos quais devido a elevada umidade relativa do ar, o conteúdo em umidade dos produtos não reduz para valores menores do que 2-3%.

c) velocidade do ar: a resistência que opõe a camada limite de ar que se encontra nos produtos cerâmicos à transferência de matéria e energia depende da velocidade do ar; à medida que a velocidade do ar aumenta, diminui a resistência; isto é válido quando a etapa controladora da secagem é a evaporação superficial da água (período de velocidade de secagem constante); se a etapa controladora do processo de secagem é a difusão da água através do sólido (período de velocidade de secagem decrescente), não há maior influência da velocidade do ar.

Os parâmetros a manter sob controle para evitar estas situações indesejáveis são: vazão, umidade e temperatura do ar e sua respectiva distribuição no interior do sólido.

### **2.5.3.3 Defeitos de secagem**

Segundo ACIMAC (1998), os defeitos que se originam na secagem são devidos, sobretudo, a uma secagem excessivamente rápida e à formação de condensados.

No primeiro caso, geram-se trincas nas bordas das peças cerâmicas nos pontos onde as tensões produzidas pelas desuniformidades de retração são maiores.

A condensação do vapor d'água pode ocorrer em qualquer ponto da superfície externa da peça cerâmica e se manifesta por trincas de pequenas dimensões e forma irregular. Frequentemente, as trincas apresentam-se como três ou mais ramos que partem de um único ponto com direções diversas, conhecidos por pés-de-galinha.

A secagem é normalmente uma fase intermediária da preparação. Além dos defeitos propriamente ditos, deve-se considerar todas as variáveis de saída, como por exemplo,



secagem insuficiente, temperatura insuficiente ou distribuição desfavorável da temperatura na peça.

#### **2.5.4 Queima do biscoito no processo biqueima**

Segundo ANFACER (1994), nesta fase da biqueima, a peça conformada e seca é submetida à temperatura de aproximadamente 1100 °C, na qual reações físico-químicas conferem à peça cerâmica consistência definitiva.

#### **2.5.5 Esmaltação e decoração**

As peças cerâmicas esmaltadas são conduzidas em linha por correias, através de máquinas para aplicação de esmalte, serigrafias e outros acessórios. Estas linhas têm comprimentos que variam de acordo com o processo decorativo (entre 20 e 100 m).

Segundo ACIMAC (1998), o esmalte é uma suspensão aquosa de numerosas substâncias resumidas em quatro categorias:

- a) componentes ativos: são aqueles que se deseja utilizar as propriedades, por exemplo, óxidos corantes e fritas;
- b) componentes passivos: são aqueles que não participam da ação dos componentes ativos, como por exemplo, água;
- c) aditivos: adicionados em pequenas quantidades para potencializar ou reduzir uma característica, como por exemplo, defloculantes;
- d) contaminações: são substâncias que podem estar presentes no esmalte e que geram uma ação degradante.

##### **2.5.5.1 Métodos de aplicação de esmalte**

Segundo ACIMAC (1998), os principais métodos de aplicação do esmalte são os seguintes.

- a) aplicação a velo (campana): gera-se uma cascata contínua de espessura uniforme e constante no tempo, sob a qual faz-se transitar a peça cerâmica, a uma velocidade constante;
- b) aplicação a disco: é um método muito difundido; o esmalte é derramado sobre um disco que gira em alta velocidade sobre seu próprio eixo (horizontal); a alta aceleração centrífuga desintegra a gota de esmalte em gotículas muito finas;

c) aplicações com aerógrafo: a nebulização ocorre por efeito de alta velocidade de saída do ar comprimido por um bico apropriado;

d) aplicação por contato: a transferência do esmalte ocorre como no princípio tipográfico.

#### **2.5.5.2 Variáveis de processo**

Os controles a serem efetuados na esmaltadeira são os seguintes:

- a) controle da densidade dos esmaltes empregados efetuado com o picnômetro;
- b) controle da viscosidade dos esmaltes empregados efetuado com copo Ford;
- c) controle dos pesos dos esmaltes empregados recolhidos com um recipiente padrão;
- d) controle visual;
- e) escolha de uma pequena amostra para ser submetida imediatamente à queima para identificar possíveis defeitos.

#### **2.5.5.3 Defeitos de esmaltação**

Segundo ACIMAC (1998), os possíveis defeitos derivados da esmaltação são vários e podem manifestar-se em formas diversas. Os defeitos mais comuns derivam da presença de bolhas no estrato do esmalte e se manifestam no produto acabado só depois da queima. Quando o esmalte funde, fecha todas as vias de escape. Os gases ou os vapores que estão presentes no esmalte formam bolhas que tendem subir à superfície, mas são impedidas pela viscosidade do próprio esmalte. Em função da velocidade de subida e dos tempos disponíveis, apresentam-se diversas situações:

- a) a bolha não tem a possibilidade de se aproximar da superfície e resta presa no estrato de esmalte sem dar origem a nenhum defeito;
- b) a bolha se aproxima da superfície, levantando o esmalte, mas sem sair;
- c) a bolha sai, deixando uma cavidade na superfície do esmalte;
- d) o esmalte tende a fechar a cavidade, que assume a forma de uma pequena depressão;
- e) o esmalte fecha completamente a cavidade e não dá origem a nenhuma condição defeituosa.



Outro defeito típico da esmaltação com discos ou aerógrafos é a formação de gotas de esmalte que caem das cabines sobre as peças cerâmicas em elaboração.

As gotas podem se formar de diversos modos:

- a) geração de uma gota de dimensões indesejáveis;
- b) desprendimento de uma parede horizontal;
- c) desprendimento de uma parede inclinada.

Outros defeitos derivados da esmaltação são:

- a) lascas produzidas por choques contra partes fixas da linha de esmaltação;
- b) pequenas rachaduras (trincas) ao longo das bordas das peças cerâmicas causadas por choques;
- c) fraturas produzidas por solicitações mecânicas na manipulação das peças;
- d) distribuição irregular do esmalte devido a uma má regulagem dos mecanismos de aplicação;
- e) pó incorporado pelo esmalte quando ainda estava fluido;
- f) escamação no esmalte causado pela falta de aderência entre esmalte e suporte pela presença de trincas no suporte ou de pó ou outras contaminações na peça cerâmica antes da esmaltação;
- g) queda de gotas de óleo na peça cerâmica de órgãos mecânicos instalados na linha de esmaltação.

Entende-se pelo termo decoração os processos de aplicação de esmaltes e/ou corantes tendo como principal escopo a realização de objetivos estéticos ou o mascaramento de pequenos defeitos superficiais do esmalte.

### **2.5.6 Queima**

A queima é a etapa mais importante do processo de fabricação. Segundo ANFACER (1994), no caso da biqueima, ocorre a vitrificação e estabilização das cores. Já no processo da monoqueima, além da estabilização das cores, acontece também a sinterização do corpo cerâmico, simultaneamente à vitrificação do esmalte, provendo fortes ligações entre a base cerâmica e a decoração.

Em geral as temperaturas para esmalte da biqueima estão em torno de 980 °C e para monoqueima acima de 1100°C, variando em função da porosidade desejada.

Segundo Henrique (1997), entende-se por queima o aquecimento, de acordo com um plano preestabelecido, das peças cruas conformadas, seguido de um resfriamento segundo um plano igualmente bem definido. Este plano de aquecimento e resfriamento é o que se conhece como ciclo de queima.

As peças sofrem uma série de transformações (químicas e físicas ) durante a queima, que produzem variações em suas características, tais que se o ciclo de queima não for adequado, podem produzir-se quedas de qualidade e inclusive peças descartadas por gretagem, deformações ou quebras.

#### **2.5.6.1 Variáveis de processo**

Segundo ANFACER (1994), a fim de realizar uma boa queima do produto cerâmico deve-se controlar os seguintes parâmetros:

- a) intervalo de queima, ou seja, a faixa de temperatura entre o início da vitrificação e o início da deformação. Este intervalo depende das características da massa e deve ser o mais amplo possível;
- b) temperatura máxima, que depende do tipo de produto que se deseja fabricar;
- c) tempo de permanência na temperatura máxima, que depende da forma e dimensões do produto, já que é necessário um tempo que permita a homogeneização da temperatura em toda a massa da peça;
- d) uniformidade de temperatura no forno;
- e) atmosfera do forno;
- f) ciclo de queima.

A determinação do ciclo de queima para cada tipo de produto será dada em função da composição da massa e esmalte, assim como da tecnologia utilizada. É importante portanto conhecer a ação do calor sobre as matérias primas cerâmicas, a fim de projetar um ciclo de queima adequado.

#### **2.5.6.2 Fases da queima**

Segundo ANFACER (1994), a sinterização se divide em três estágios principais: inicial, intermediário e final.



a) estágio inicial: neste estágio, as partículas aderem entre si, formando aglomerados e os pescoços começam a se formar nos pontos de contato; a densidade de um pó típico pode aumentar entre 50 e 60 %; Neste estágio observamos algum rearranjo das partículas.

b) estágio intermediário: a antiga estrutura, com contornos de grão bem definidos, agora se transforma numa massa constituída por duas fases, uma formada pelas partículas coalescidas e outra formada pelos poros; depois que a superfície do pescoço tenha sido suavizada pelo próprio crescimento, a inibição do deslocamento dos contornos decresce até que o crescimento dos grãos se torne possível; a fase formada pelos poros começa a diminuir até que os canais de comunicação entre eles se fechem, havendo então formação dos poros discretos; isto ocorre com cerca de 92 a 95% de densidade e determina o fim do estágio intermediário.

c) estágio final: os poros neste estágio não estão mais interligados, e aparecem como pequenas esferas, normalmente contendo gás; ocorre o crescimento de grãos e alguns poros acabam por ser incorporados a eles, permanecendo em seu interior; é ainda possível que se tenha crescimento de poros através da coalescência dos mesmos.

Vários tipos de mecanismos de transporte de massa podem ocorrer durante a sinterização, tais como, escoamento viscoso, escoamento plástico, rearranjo de partículas, evaporação-condensação, difusão superficial, difusão no contorno de grão e difusão volumétrica. A Tabela 2.5 apresenta alguns mecanismos de transporte de massa que atuam na sinterização de pós cerâmicos. A presença maior ou menor destes mecanismos depende da natureza dos pós no processo de sinterização.

Tabela 2.5 Mecanismo de transporte.

Mecanismo	Caminho de transporte	Fonte de massa	Sumidouro
1	Difusão superficial	superfície	pescoço
2	Difusão na rede	superfície	pescoço
3	Transporte de vapor	superfície	pescoço
4	Difusão no contorno	contorno de grão	pescoço
5	Difusão na rede	contorno de grão	pescoço

### **2.5.6.3 Ação do calor sobre os produtos cerâmicos.**

Segundo Henrique (1997), em linhas gerais, a ação do calor sobre as matérias-primas cerâmicas pode dividir-se nas seguintes classificações.

a) reações químicas: reações que acontecem nos silicatos e aluminossilicatos; reações provenientes das impurezas e reações de oxidação-redução.

b) transformações físicas: dilatação, sinterização, densificação e piroplasticidade.

### **2.5.6.4 Defeitos de queima**

Segundo ACIMAC (1994), existe uma série de defeitos que são ditos defeitos de queima pois ficam evidente após a queima. No entanto, na maioria das vezes os defeitos são originados nas fases precedentes e a queima apenas os torna visíveis.

a) fissuras: são defeitos de continuidade, que se apresentam como fissuras abertas ou gretagens capilares, as quais derivam do processo de fabricação; são visíveis na superfície da peça; normalmente começam na borda e continuam em direção ao centro; as fissuras podem ser geradas antes ou após a queima (resfriamento); no entanto, a dinâmica da formação das fissuras tem elementos comuns em ambos os tipos, as diferenças de retração entre a borda e centro da peça geram tensões de tração que em alguns pontos atingem valores superiores ao limite de resistência do material.

b) quebra de pré-aquecimento: são fissuras ou fraturas que se geram na peça cerâmica em consequência de excessivas tensões produzidas por aquecimento anormal na fase de pré-aquecimento; são caracterizadas pelo fato das bordas da fissura serem abertas; esse tipo de defeito reduziu-se sensivelmente com o advento da queima em um plano único; verifica-se a sua ocorrência em peças de grande espessura.

c) trincas de resfriamento: são pequenas fissuras de bordas fechadas, difíceis de se ver sem o auxílio de um líquido (água ou querosene), que partem das bordas e que apresentam comprimentos variáveis.

d) trincas de secagem: a secagem é um fenômeno similar ao resfriamento: quando há uma perda de umidade, há uma retração da massa; as fissuras de secagem são facilmente reconhecíveis por sua forma; são abertas (às vezes mesmo de alguns milímetros) e partem da zona média do lado.



e) coração negro: o coração negro é caracterizado por uma mancha escura que permanece no corpo da peça e se torna visível somente com a ruptura da mesma. A causa desse defeito é função da presença de substâncias orgânicas, que não são completamente queimadas, ou de uma oxidação incompleta do ferro.

f) defeitos dimensionais: os defeitos dimensionais são de dois tipos: defeitos de planaridade e defeitos de forma; suas causas são uma retração não uniforme das diversas partes da peça; podem ser geradas por desuniformidade de modelagem e/ou por diferenças de temperaturas anormais no interior da peça, que se apresentam durante a fase de queima, especialmente na sua fase final; os principais defeitos de planaridade podem ser sintetizados em quatro classes: peças com somente os ângulos voltados para cima, peça com ângulos voltados para baixo, peça internamente côncava e peças internamente convexa; os principais defeitos de forma são agrupados em três classes: curvatura de um lado (luneta), efeito trapézio e fora de calibre.

g) variações de tonalidade: as variações nas tonalidades podem ter origem na quantidade incorreta de pigmento aplicada sobre a peça, acentuada difusão do pigmento, ocorrência de uma reação química indesejada e formulação incorreta do esmalte.

## **3 CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO**

Neste capítulo, será apresentada uma extensa revisão bibliográfica sobre controle estatístico de processo. A maior parte desse texto foi baseado em Ribeiro e Caten (1997). Os leitores que já conhecem controle estatístico de processo talvez possam fazer uma leitura de tópicos específicos de seu interesse. A estrutura deste capítulo foi concebida da seguinte forma: no item 3.1, será apresentada uma introdução ao controle estatístico de processo; no item 3.2, será apresentada a carta de controle para variáveis; no item 3.3, será apresentada a carta de controle para atributos e no item 3.4 será apresentada uma pequena revisão de análise multivariada. As equações e constantes utilizadas nos cálculos apresentados neste capítulo foram retiradas de Montgomery, 1985.

### **3.1 Introdução ao controle estatístico do processo**

#### **3.1.1 Considerações iniciais**

De acordo com a definição de Campos (1992), um produto ou serviço de qualidade é aquele que atende perfeitamente, de forma confiável, de forma acessível, de forma segura e no tempo certo às necessidades do cliente.

Cada produto possui um número de elementos que, em conjunto, descrevem sua adequação ao uso. Esses elementos são freqüentemente chamados características da qualidade.

Segundo Montgomery (1985), essas características podem ser de diversos tipos: físicas, tais como comprimento, peso, voltagem e viscosidade; sensoriais, como gosto, aparência e cor; ou de orientação temporal, como confiabilidade, manutenção, utilidade e durabilidade.



O controle estatístico do processo (CEP) é uma técnica estatística aplicada à produção que permite a redução sistemática da variabilidade nas características da qualidade de interesse, contribuindo para a melhoria da qualidade intrínseca, da produtividade, da confiabilidade e do custo do que está sendo produzido.

### **3.1.2 Definição do controle estatístico do processo**

O controle estatístico do processo é um sistema de inspeção por amostragem, operando ao longo do processo, com o objetivo de verificar a presença de causas especiais, ou seja, causas que não são naturais ao processo e que podem prejudicar a qualidade do produto manufaturado. Uma vez identificadas as causas especiais, podemos atuar sobre elas, melhorando continuamente os processos de produção e, por conseguinte, a qualidade do produto final.

O CEP fornece uma radiografia do processo, identificando sua variabilidade e possibilitando o controle dessa variabilidade ao longo do tempo através da coleta de dados continuada, análise e bloqueio de possíveis causas especiais que estejam tornando o sistema instável.

Num ambiente competitivo, o controle estatístico abre caminho para melhorias contínuas, uma vez que garante um processo estável, previsível, com uma identidade e capacidade definidas, cuja evolução pode ser facilmente acompanhada.

### **3.1.3 Objetivos do controle estatístico do processo**

O principal objetivo do CEP é possibilitar um controle eficaz da qualidade, feito pelo próprio operador em tempo real. Isso aumenta o comprometimento do operador com a qualidade do que está sendo produzido e libera a gerência para as tarefas de melhoria.

O CEP possibilita o monitoramento das características de interesse, assegurando que elas irão se manter dentro de limites preestabelecidos e indicando quando devem ser tomadas ações de correção e melhoria. É importante ressaltar a importância de se detectar os defeitos o mais cedo possível, para evitar a adição de matéria-prima e mão-de-obra a um produto defeituoso.

O CEP objetiva aumentar a capacidade dos processos, reduzindo refugo e retrabalho, e, por consequência, o custo da má qualidade. Assim, ele proporciona às empresas a base

para melhorar a qualidade de produtos e serviços e, simultaneamente, reduzir substancialmente o custo da má qualidade.

### **3.1.4 Origens históricas das cartas de controle**

O controle da qualidade iniciou na década de 20, nos Estados Unidos, como resultado de avanços na tecnologia de medição e da aplicação industrial das cartas de controle, desenvolvidas pelo Dr. Walter A. Shewhart, da empresa de telefonia *Bell Telephone Laboratories*.

O Dr. Walter Shewhart desenvolveu uma técnica simples mas poderosa para fazer a distinção entre causas comuns e causas especiais: as cartas de controle do processo.

Ele propôs o uso das cartas de controle para a análise dos dados provenientes de amostragem, substituindo a mera detecção e correção de produtos defeituosos pelo estudo e prevenção dos problemas relacionados à qualidade, visando impedir que produtos defeituosos fossem produzidos.

Em seguida, o controle da qualidade foi também adotado na Inglaterra. Em 1935, os trabalhos do estatístico E. S. Pearson foram utilizados como base para os padrões normativos britânicos.

A segunda guerra mundial foi decisiva para a aplicação do controle de qualidade e da estatística moderna em um maior número de indústrias americanas. Após a guerra, foi a vez do Japão adotar o controle estatístico da qualidade, seguindo os padrões americanos.

A partir de 1954, com os seminários do engenheiro americano J. M. Duran, os japoneses começaram a perceber que o controle da qualidade dependia muito de fatores humanos e culturais. A partir dessa percepção, foi desenvolvido um método japonês para o controle da qualidade, que deu origem ao controle da qualidade total no estilo japonês, envolvendo a participação de todos os setores e funcionários da empresa e que muito contribuiu para que o Japão passasse a fabricar produtos de mais alta qualidade.

Recentemente, vários países perceberam as vantagens do controle da qualidade e um grande número de empresas em todo o mundo vêm utilizando os métodos do controle da qualidade, com as adaptações necessárias às suas situações específicas.



### **3.1.5 Sistema de controle do processo**

O controle da qualidade depende de quatro elementos fundamentais, que constituem um sistema de controle do processo e que serão apresentados a seguir.

#### **3.1.5.1 O processo em si**

O processo em si é uma combinação de equipamentos, insumos, métodos, procedimentos e pessoas, tendo como objetivo a fabricação de um bem ou o fornecimento de um serviço.

O desempenho do processo depende da maneira como ele foi projetado e construído e da maneira como ele é operado. O restante do sistema, que será descrito na continuação, é útil na medida em que contribui para melhorar o desempenho do processo.

#### **3.1.5.2 Informações sobre o processo**

As informações sobre o desempenho de um processo são obtidas a partir do estudo cruzado dos itens a seguir: a) qualidade das características do produto final, b) qualidade das características intermediárias e c) ajuste dos parâmetros do processo.

As informações sobre o processo são úteis para orientar as ações de melhoria. Se não se pretende agir sobre o processo, coletar informações é inútil e dispendioso.

#### **3.1.5.3 Ações sobre o processo**

A coleta de dados e as ações ao longo do processo são orientadas para o futuro, pois permitem detectar o defeito assim que ele é gerado, possibilitando a atuação sobre o processo no momento e local adequado. Essas ações podem envolver: controle sobre as matérias primas; ajuste nos parâmetros do processo; manutenção periódica; treinamento de operadores, etc. Corrigindo-se o processo, evita-se que novas peças defeituosas sejam produzidas.

#### **3.1.5.4 Ações sobre o produto final**

As inspeções sobre o produto final são orientadas para o passado, pois elas permitem apenas separar o produto conforme do produto não-conforme (refugo) que pode eventualmente ser retrabalhado. As inspeções têm algumas vantagens pois impedem que

produtos defeituosos cheguem ao cliente, mas não são uma forma eficiente de ação. Agir sobre o processo é mais eficaz, pois impede que novas peças defeituosas sejam produzidas.

### **3.1.6 Variabilidade: causas comuns e causas especiais**

A variabilidade está sempre presente em qualquer processo produtivo, independente de quão bem ele seja projetado e operado. Se compararmos duas unidades quaisquer, produzidas pelo mesmo processo, elas jamais serão exatamente idênticas.

Contudo, a diferença entre peças pode ser grande, provocando o aparecimento de produtos defeituosos, ou pode ser praticamente imperceptível. Além disso, as fontes de variabilidade podem agir de forma diferente sobre o processo. Conforme a fonte de variabilidade, o resultado pode ser: a) pequenas diferenças peça-a-peça (habilidade do operador), b) alteração gradual no processo (desgaste de ferramentas) e c) alteração brusca no processo (mudança de procedimento, queda de corrente, etc.).

Para o gerenciamento do processo e redução da variabilidade, é importante investigar as causas da variabilidade no processo. O primeiro passo é distinguir entre causas comuns e causas especiais.

Deming (1986) explica que a confusão entre causas comuns e especiais leva à maior variabilidade e a custos mais elevados. A atuação em causas comuns como se fossem causas especiais pode levar a um aumento indesejado da variação, além de representar um custo desnecessário.

Por outro lado, se causas especiais passarem despercebidas, elas podem ser incorporadas ao resultado do processo, tornando aceitável o que deveria ser rejeitado, além de se perder uma oportunidade de melhoria do produto.

#### **3.1.6.1 Causas comuns**

As causas comuns são as diversas fontes (causas) de variação que atuam de forma aleatória no processo, gerando uma variabilidade inerente do processo. Essa variabilidade representa o padrão natural do processo, pois é resultante do efeito acumulativo de pequenas fontes de variabilidade (causas) que acontecem diariamente.

Um processo que apresenta apenas as causas comuns atuando é dito um processo estável ou sob controle, pois apresenta sempre a mesma variabilidade ao longo do tempo.



Devido à variabilidade inerente do processo, as medidas individuais de uma característica de qualidade são todas diferentes entre si, mas quando agrupadas elas tendem a formar um certo padrão. Quando o processo é estável, esse padrão pode ser descrito por uma distribuição de probabilidade, como podemos ver na Figura 3.1.

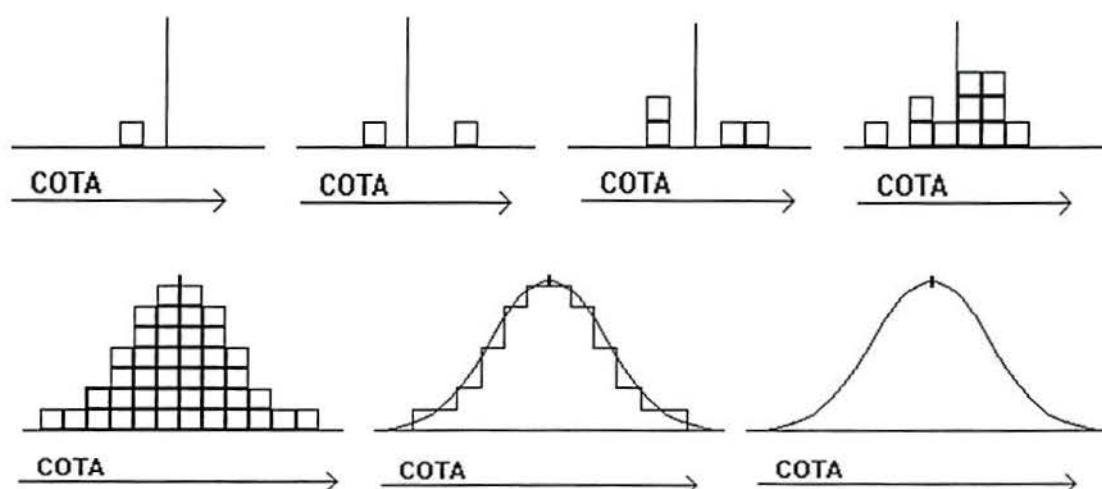


Figura 3.1 Distribuição de probabilidade de um processo.

Uma distribuição de probabilidade se caracteriza por três parâmetros, como podemos visualizar na Figura 3.2.

<p>- Parâmetro de localização: que representa a tendência central dos dados. Ao lado podem ser vistas duas distribuições com parâmetros de localização diferentes</p>	
<p>- Parâmetro de dispersão: que representa a variabilidade dos dados em torno da tendência central. Ao lado podem ser vistas duas distribuições com parâmetros de dispersão diferentes</p>	
<p>- Parâmetro de forma: que representa a forma da distribuição: simétrica, assimétrica, uniforme, exponencial, etc.. Ao lado podem ser vistas duas distribuições com parâmetros de forma diferentes</p>	

Figura 3.2 Parâmetros de uma distribuição de probabilidade.

As causas comuns, em geral, só podem ser resolvidas por uma ação global sobre o sistema, e muitas vezes a atuação sobre elas não se justifica economicamente. Os operadores estão em boa posição para identificá-las, mas a sua correção exige decisão gerencial.

### 3.1.6.2 Causas especiais

As causas especiais são causas que não seguem um padrão aleatório e por isso também são chamadas de causas assinaláveis. Elas fazem com que o processo saia fora de seu padrão natural de operação, ou seja, provocam alterações na forma, tendência central ou variabilidade das características de qualidade. Elas reduzem significativamente o desempenho do processo e devem ser identificadas e neutralizadas, pois sua correção se justifica economicamente.

As causas especiais geralmente são corrigidas por ação local e, por isso, são de responsabilidade dos operadores, apesar de algumas vezes a gerência estar em melhor posição para resolver o problema.

Na Tabela 3.1, apresenta-se um resumo das causas comuns e especiais.

Tabela 3.1 Resumo das causas comuns e especiais.

<b>Tipo de causa</b>	<b>Tipo de variação</b>	<b>Status do processo</b>	<b>Ação requerida</b>
<b>Comum</b>	Inerente, natural, previsível	Em controle estatístico (estável)	Ação sobre o sistema
<b>Especial</b>	Errática, alteração brusca, fuga gradual	Fora de controle (instável)	Ação localizada

A meta de um sistema de controle do processo é permitir que sejam realizadas decisões corretas referentes a quando agir sobre o processo, pois tanto o excesso de ação quanto a falta de ação são prejudiciais. Assim, a função do sistema de controle do processo é fornecer um sinal estatístico sempre que causas especiais estejam presentes, de forma que ações corretivas possam ser disparadas.



### 3.1.7 Análise das cartas de controle

No início de estudos que utilizam cartas de controle, o processo é colocado em funcionamento e são coletados dados referentes à característica em estudo. Esses dados podem ser, entre outros: a) dimensões de uma peça usinada, b) número de defeitos em um circuito impresso, c) viscosidade de um produto químico, d) resistência de um componente e e) peso de um refrigerante.

Logo após, calcula-se a média, o desvio-padrão e então os limites de controle associados às causas comuns de variabilidade poderão ser definidos. Na Figura 3.3, pode-se visualizar os limites de controle em um exemplo de carta de controle.

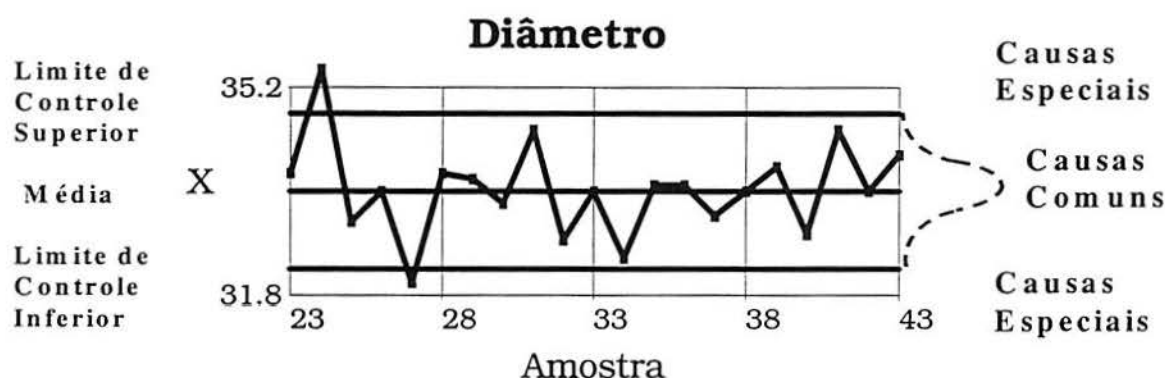


Figura 3.3 Exemplo de uma carta de controle.

#### 3.1.7.1 Análise da estabilidade do processo

Uma vez definidos os limites de controle, os dados continuam sendo coletados e são plotados na carta de controle.

Como pode ser visualizado na Figura 3.4 e na Figura 3.5, se apenas as causas comuns estão presentes, o processo é estável e o esperado é que os pontos plotados permaneçam dentro dos limites de controle. Se causas especiais estão presentes, o processo é instável e são esperados pontos fora dos limites de controle ou padrões não aleatórios na sequência de pontos, indicando a provável presença de causas especiais.

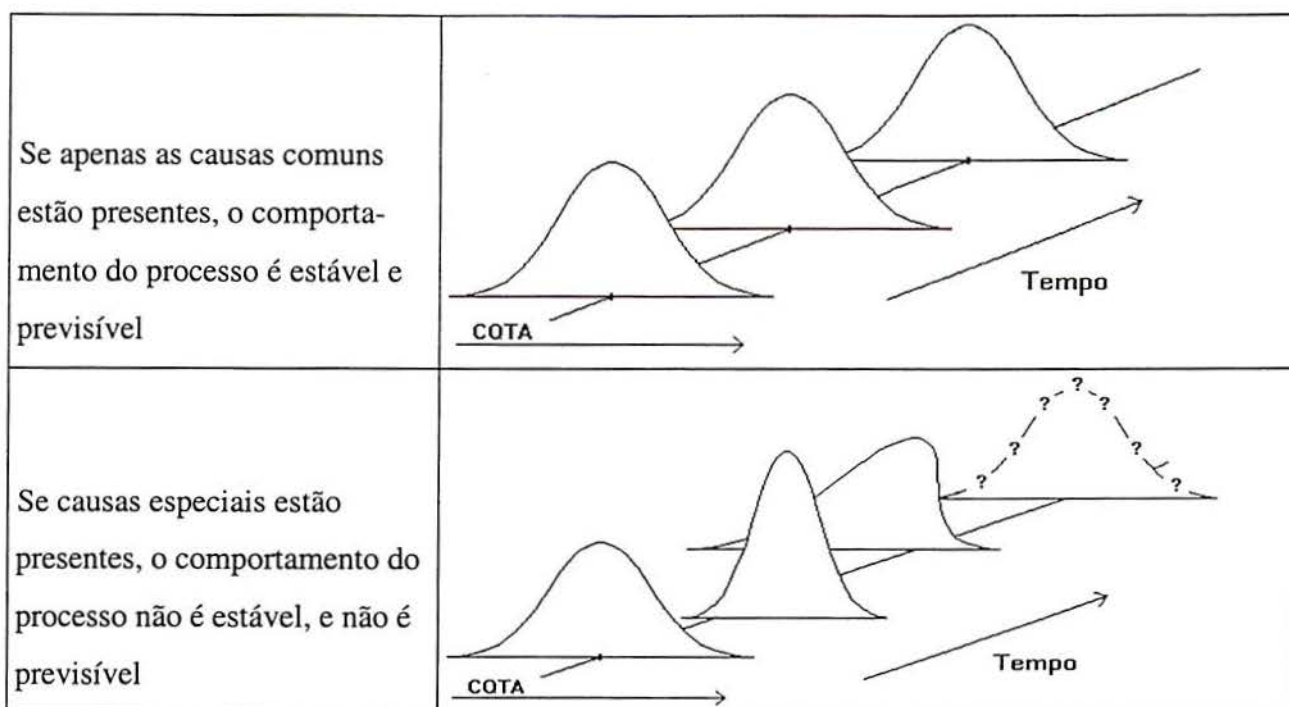


Figura 3.4 Distribuição de probabilidade de um processo estável versus instável.

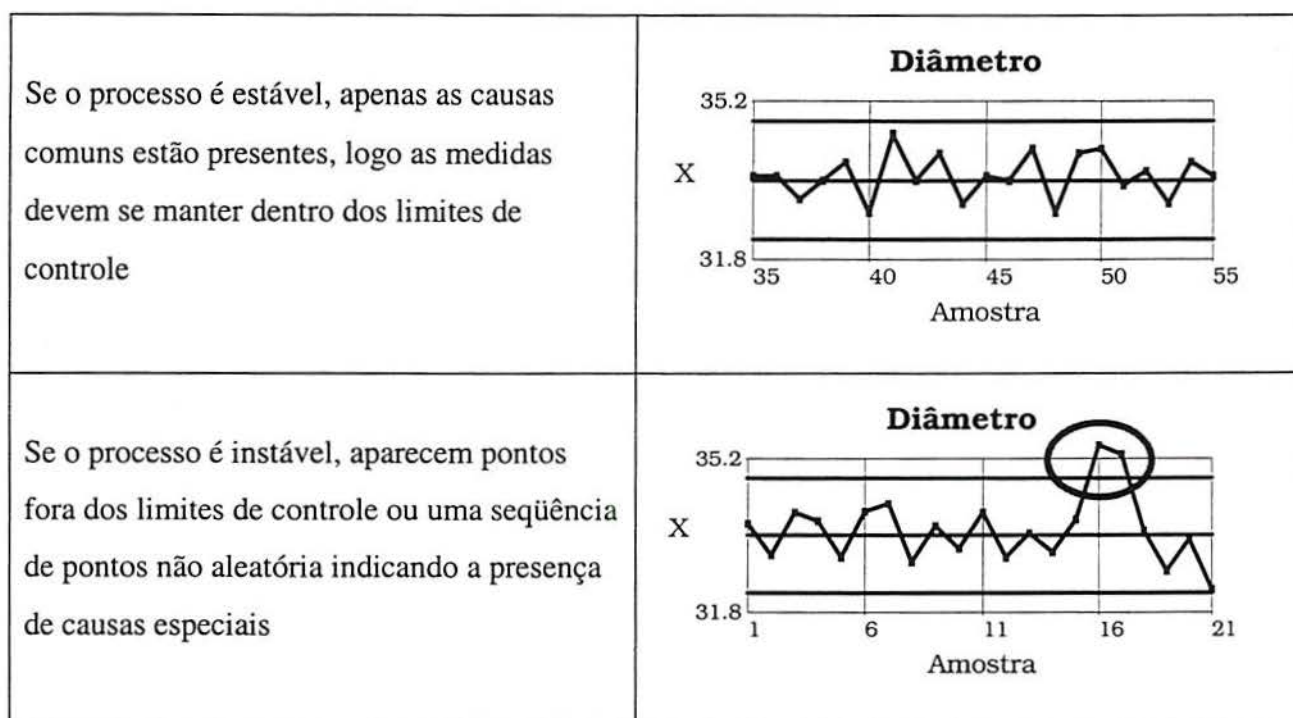


Figura 3.5 Cartas de controle de um processo estável versus instável.

Em geral, no início do monitoramento, os processos apresentam várias causas especiais, como pode ser visto na Figura 3.6. Então, acontecem ações dirigidas pelas cartas de controle, e aos poucos as causas especiais vão sendo identificadas e eliminadas uma a uma. Com o passar do tempo, obtém-se um processo estável e previsível.



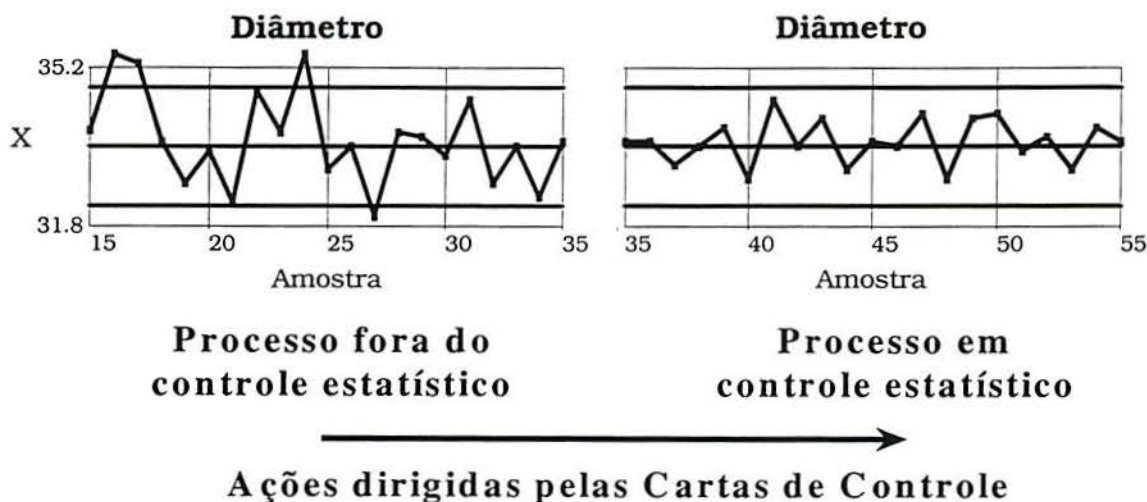


Figura 3.6 Ações dirigidas pelas cartas de controle.

### 3.1.7.2 Análise da capacidade do processo

Após a eliminação de todas as causas especiais, o processo estará funcionando em controle estatístico. Um processo em controle estatístico ou estável é aquele que possui variabilidade associada apenas às causas comuns, ou seja, ele segue um certo padrão previsível ao longo do tempo. No entanto, esse padrão estável do processo pode ou não ser capaz de produzir peças que atendam às especificações de clientes ou de projeto.

Uma vez eliminadas as causas especiais, pode-se então avaliar a real capacidade do processo comparando sua variabilidade (associada apenas às causas comuns) com as especificações.

Como pode-se visualizar na Figura 3.7, se a variabilidade devida às causas comuns for excessiva, ou seja, maior do que a amplitude das especificações, o processo é dito não capaz e a gerência deve atuar sobre o sistema. Se a variabilidade inerente do processo for menor do que a amplitude de especificações, o processo é dito capaz. Nesse caso, as ações devem ser tomadas apenas quando o processo apresentar eventuais causas especiais.

Quando o processo é instável, ou seja, apresenta causas especiais, a avaliação de sua capacidade não faz muito sentido, pois reflete apenas um determinado momento já que o processo não apresenta um comportamento previsível.

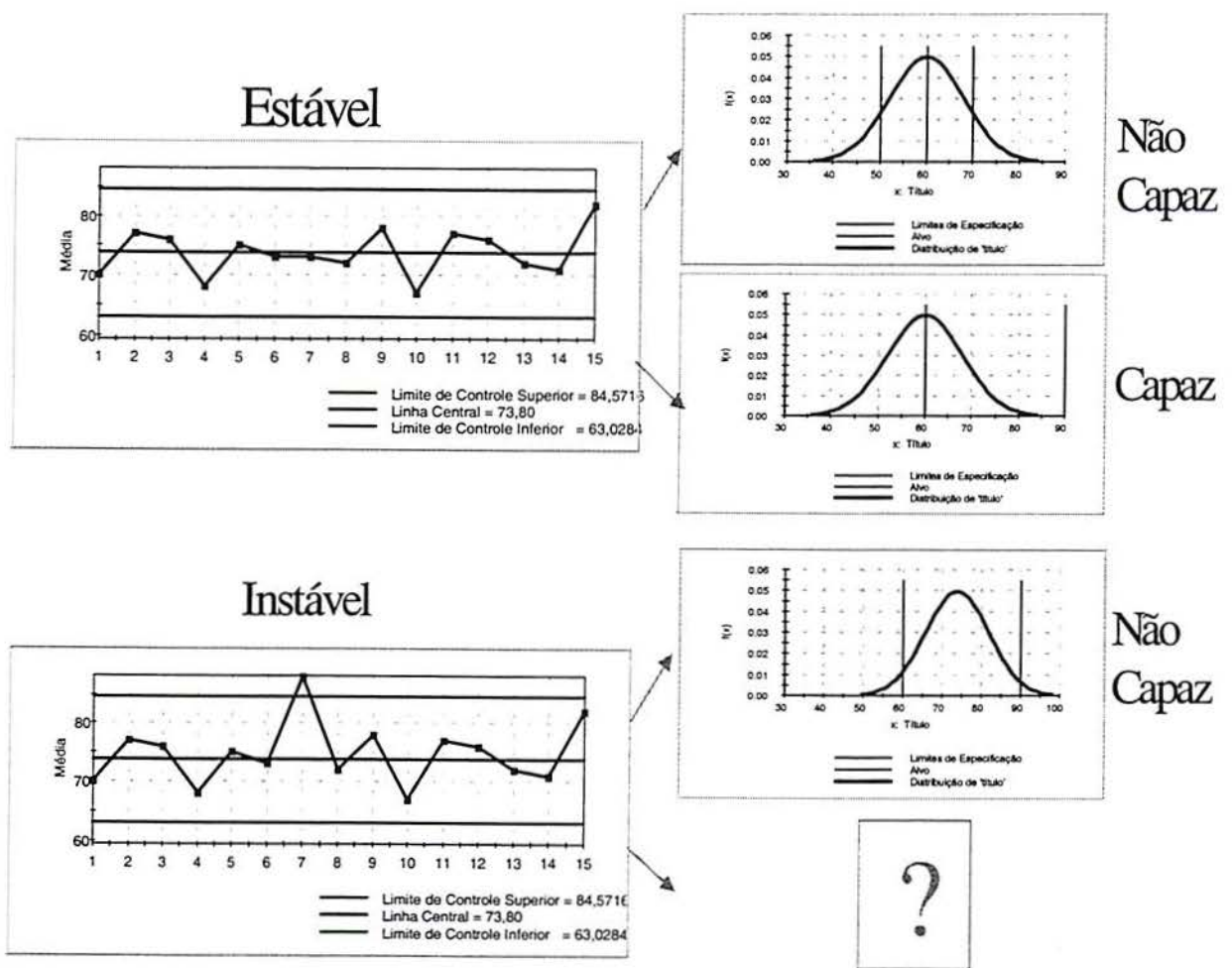


Figura 3.7 Avaliação da capacidade de um processo estável versus instável.

### 3.1.7.3 Procedimento iterativo de melhoria

As cartas de controle fazem parte de um procedimento iterativo de melhoria, como pode-se visualizar na Figura 3.8.

Primeiro, coleta-se dados para calcular os limites de controle, ou seja, define-se qual o padrão de variabilidade natural do processo. Uma vez calculados os limites de controle, faz-se a análise da estabilidade do processo, ou seja, monitoram-se as cartas de controle para identificar a presença de causas especiais. Se o processo não for estável, os operadores devem agir localizadamente no sentido de corrigir as eventuais causas especiais.

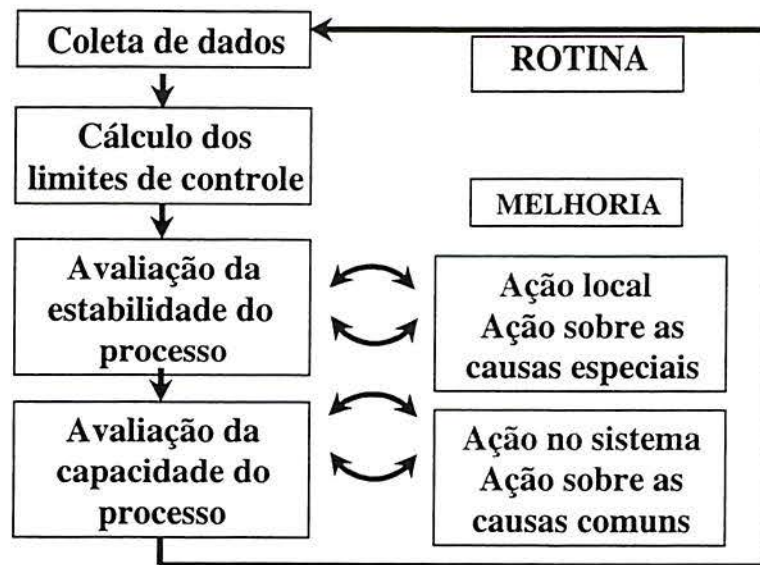


Figura 3.8 Procedimento iterativo de melhoria.

Uma vez identificadas e eliminadas as causas especiais, o processo se torna estável e previsível, logo podemos avaliar sua real capacidade de produzir peças que atendam às especificações. Se a variabilidade associada às causas comuns for maior do que a amplitude das especificações, a gerência deve atuar sobre o sistema como um todo para reduzir essa variabilidade.

Como pode ser visto, o procedimento de melhoria da qualidade através do controle estatístico acontece em duas etapas principais. Primeiro, eliminando-se as causas especiais para tornar o processo estável e previsível ao longo do tempo. Essa melhoria é conseguida através de ações localizadas, efetuadas pelos operadores. Essas ações se justificam economicamente e, em geral já são suficientes, pois freqüentemente verifica-se que o processo, uma vez estável, atende às especificações. Segundo, quando necessário, atuando-se no sistema para reduzir as causas comuns de variabilidade. Essa melhoria é de responsabilidade da gerência, pois em geral envolvem maiores investimentos que nem sempre se justificam economicamente.

Ou seja, começa-se atuando nas causas especiais que provocam um dano bastante grande ao processo e são relativamente fáceis de bloquear e, apenas quando necessário, atua-se nas causas comuns de variabilidade, que mobilizam maiores recursos.



### 3.1.8 Inspeção versus controle estatístico do processo

A inspeção e o controle estatístico do processo possuem características e objetivos distintos, como será esclarecido nos tópicos abaixo.

#### 3.1.8.1 Inspeção

No curto prazo, uma inspeção 100% fornece mais resultados na detecção de unidades defeituosas, pois elas são filtradas e dirigidas para retrabalho ou sucata.

No entanto, as atividades de inspeção não promovem a melhoria dos processos, pois tomam tempo e mobilizam os recursos em atividades que não agregam valor. Além disso, levam a um certo relaxamento na manufatura, uma vez que tudo vai ser inspecionado depois.

O processo de filtrar unidades defeituosas gera uma distribuição que se assemelha ao modelo uniforme, com muitas unidades afastadas do alvo, conforme aparece na Figura 3.9.

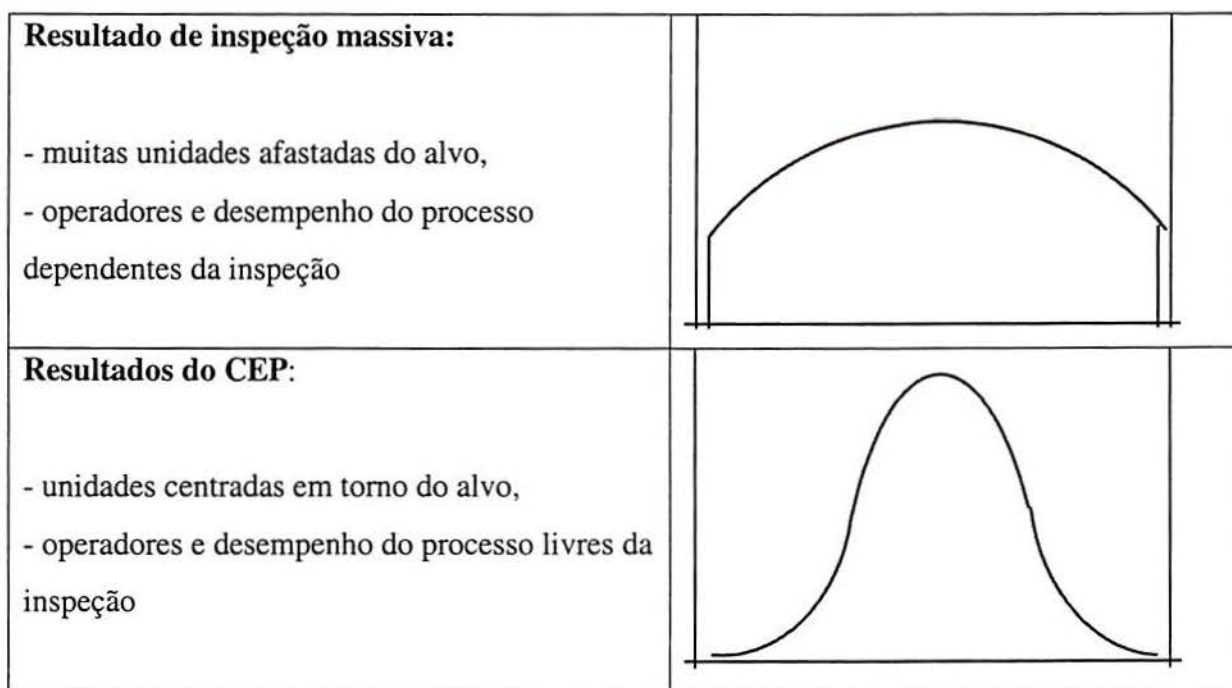


Figura 3.9 Distribuição de probabilidade de um processo com inspeção 100% versus CEP.

### **3.1.8.2 Controle estatístico do processo**

O CEP, ao contrário da inspeção 100%, prioriza ações sobre as causas especiais, ou seja, sobre a origem do problema. Ele não utiliza inspeção massiva, pois isso iria mobilizar os recursos que são importantes para a solução das causas especiais.

Além disso, de nada adiantaria identificar, logo no primeiro dia, um grande número de causas especiais, pois faltariam recursos para a investigação dessas causas.

O CEP opera numa escala de tempo mais longa, pois as causas especiais vão sendo identificadas e eliminadas aos poucos, ao longo do tempo, com paciência e persistência.

No final das contas, o CEP atinge aquilo que aparentemente não é o seu objetivo, ou seja: um processo livre de unidades defeituosas, que atende amplamente às especificações e cujo desempenho independe das atividades de inspeção.

### **3.1.8.3 Vantagens do controle estatístico do processo**

O emprego correto das cartas de controle: a) permite que o monitoramento do processo seja executado pelos próprios operadores, b) fornece uma distinção clara entre causas comuns e causas especiais, servindo de guia para ações locais ou gerenciais, c) fornece uma linguagem comum para discutir o desempenho do processo, possibilitando a alocação ótima dos investimentos em melhoria da qualidade e d) auxilia o processo a atingir alta qualidade, baixo custo unitário, consistência e previsibilidade.

A melhora da qualidade, representada pela redução da variabilidade do processo, promove, natural e inevitavelmente, um aumento de produtividade. Melhorando a qualidade, os custos diminuem devido à redução do retrabalho, erros e atrasos, e da melhor utilização da tecnologia e matéria-prima. Conseqüentemente, a produtividade aumenta, possibilitando a captação de mercados. Trabalhando-se continuamente pela qualidade, os novos negócios são mantidos e amplia-se a fatia de mercado.

### 3.1.9 Etapas na implantação do controle estatístico do processo

Hradesky (1988) propõe uma abordagem sistemática com doze etapas chamada “Processo de Melhoria da Qualidade e Produtividade em 12 Etapas (PQI)”.

Essa abordagem é realizada por equipes compostas de gerentes de departamentos, supervisores, engenheiros e pessoas direta ou indiretamente envolvidas com o produto ou processo que será controlado estatisticamente.

A equipe é auxiliada por um comitê de apoio constituído pela média gerência que, por sua vez, se reporta à alta gerência.

A seguir são apresentadas resumidamente as 12 etapas propostas por Hradesky (1988).

**Etapas 1 – Identificação do projeto** – Essa etapa define claramente a área do problema e desenvolve uma justificativa econômica para o projeto, incluindo uma relação do futuro impacto e oportunidades potenciais de melhoria do problema. Hradesky (1988) recomenda a elaboração de um fluxograma do processo identificando pontos críticos no processo e possíveis aplicações das cartas de controle estatístico. Esses documentos informando a magnitude do projeto, são submetidos à aprovação do comitê de apoio que, por sua vez, decide se continua ou não o projeto. Depois que o nível de melhoria é estimado e aprovado, ele se torna a meta dos indicadores de desempenho das cartas de controle, criados na etapa 3.

**Etapas 2 – Plano e relatório** – Essa etapa administrativa ajuda o líder a gerenciar todas as etapas do projeto. A proposta é manter o projeto em dia com o cumprimento das datas e desempenho das metas. São criados três documentos nessa etapa:

a) um cronograma que lista as doze etapas e suas respectivas datas de início e fim, b) um relatório de progresso que deve ser atualizado semanalmente e deve avaliar o progresso da equipe nas várias dimensões principais e c) um plano PQI anual que identifica futuros projetos e estima melhorias de qualidade e produtividade.

Outro elemento dessa etapa inclui apresentações do andamento do projeto pelos líderes da equipe para a alta gerência com o objetivo de relatar e motivar.

**Etapas 3 – Medidas de desempenho** – Essa etapa estabelece um método para medir o desempenho em termos de qualidade, produtividade e cronograma em relação às metas estabelecidas. As ações para desenvolver medidas de desempenho são:

a) determinar os critérios de medida, b) determinar o sistema de medida, c) coletar os dados e d) relatar o desempenho.



O objetivo dessa etapa é estabelecer medidas de desempenho para avaliar o progresso do projeto.

Etapa 4 – Análise e solução do problema – Esta é a primeira etapa relacionada diretamente com a real melhoria do processo. Hradesky (1988) recomenda que a equipe esteja preparada para o uso de técnicas tais como: diário de bordo, auditoria de processo, diagrama de causa-efeito, análise das causas e projeto de experimentos. Essas técnicas definirão causas e ações preventivas para os problemas identificados na etapa 1.

Etapa 5 – Capacidade da inspeção – Essa etapa usa um método para avaliar a capacidade do sistema de medição, ou seja, os erros no sistema de medição de variáveis e atributos. Essa etapa é importante pois o sistema de medição está sujeito a variações, mesmo se os resultados são obtidos por um sistema de medição mecânico, ou um mecanismo eletrônico complexo ou um sistema passa/não passa. O método define critérios para aceitar ou rejeitar uma certa inspeção e garante que os dados coletados estejam corretos. A equipe deve usar as técnicas de solução de problemas vistas na etapa 4 para solucionar possíveis problemas no sistema de medição. Segundo Hradesky (1988), a avaliação do sistema de medição é um elemento crítico para o sucesso do CEP.

Etapa 6 – Capacidade do processo – Essa etapa contempla um procedimento sistemático para avaliar a variabilidade natural do processo aplicando os gráficos do controle estatístico do processo. Essa etapa fornece critérios para aceitar ou rejeitar um processo e fornece caminhos para as ações corretivas. Essa etapa demonstra se o processo é capaz de atender às metas estabelecidas na etapa 1. Os resultados do estudo de capacidade são usados para estabelecer os limites de controle dos gráficos que serão utilizados para o controle em tempo real do processo. O estudo de capacidade do sistema de medição e capacidade do processo são as duas etapas principais para a implantação do controle estatístico do processo.

Etapa 7 – Matriz de ações preventivas e corretivas – Essa etapa fornece ações específicas para estabilizar o processo quando ele sai fora do controle. A matriz lista todos os defeitos conhecidos e condições do processo que estejam sendo avaliados e suas respectivas ações preventivas e corretivas. Com isso, a matriz ajuda o operador a resolver os problemas com a mínima assistência dos supervisores e fornece consistência na solução de problemas. Essa matriz deve estar localizada próxima do gráfico de controle do processo, eliminando o tempo gasto com suposições e atrasos no início da ação preventiva e corretiva. A real diferença entre o sucesso e o fracasso é o lapso de tempo entre a ocorrência de uma condição

fora de controle (causa especial) e a ação corretiva tomada para tornar o processo estável novamente e a ação preventiva para a não recorrência dessa condição fora de controle.

Etapa 8 – Documentação de procedimentos e responsabilidades - O sucesso do controle estatístico vai muito mais além do monitoramento do gráfico de controle. Os sinais dos gráficos devem ser interpretados adequadamente e ações apropriadas devem ser tomadas. Essa etapa documenta o método para introduzir e manter o controle estatístico do processo. Ela estabelece responsabilidades departamentais para as diferentes atividades associadas com o controle estatístico do processo, incluindo instalação, manutenção, monitoramento dos gráficos de controle, diário de bordo e matriz de ações. Essa etapa designa quem faz o quê, quando o processo sai fora de controle.

Etapa 9 – Implantação do controle do processo – Até essa etapa, apenas algumas pessoas estavam envolvidas com o desenvolvimento do projeto. A intenção dessa etapa é comunicar e coordenar a implantação efetiva do controle estatístico do processo e identificar todas as pessoas com o procedimento do controle do processo. Nessa etapa, a equipe precisa verificar se todas as etapas anteriores foram cumpridas para então tornar o controle estatístico do processo uma tarefa continuada do dia-a-dia.

Etapa 10 – Prevenção de problemas – Essa etapa contempla um método para controlar fatores críticos que possam levar a problemas futuros. Nessa etapa a equipe tenta antecipar futuros problemas e desenvolver ações preventivas que reduzam a probabilidade de ocorrência de um problema e planos de contingência que minimizem o impacto do problema quando eles ocorrerem. Essa etapa garante que todos os ganhos serão mantidos e fornece informações valiosas para a melhoria futura e uma ruptura nos novos níveis de desempenho. A análise do modo e efeito de falha pode ser usado nessa etapa.

Etapa 11 – Responsabilidade dos defeitos – Essa etapa identifica e relata os tipos de defeitos e suas origens. As origens dos defeitos são geralmente as mesmas, independente do tipo de indústria, e podem ser classificadas como mão-de-obra, processo, projeto e matéria-prima. Essa etapa não termina com a identificação da origem dos defeitos e atribuição de responsabilidades. A equipe deve desenvolver um programa para reconhecer indivíduos que contribuíram para o sucesso do projeto e programas para incentivar empregados que não tiveram desempenho satisfatório. Muitas vezes, esses programas podem ser incorporados ao programa de incentivos da empresa.



Etapa 12 – Medidas de eficiência – Embora cada etapa seja verificada antes de sua conclusão, são necessárias medidas de eficiência para o projeto global a fim de garantir que os resultados desejados sejam alcançados. Essa etapa envolve auditorias de produto, processo, sistema e financeira que avaliam as melhorias adquiridas e identificam novas oportunidades. Na verdade, as auditorias avaliam o desempenho da equipe em alcançar os objetivos estabelecidos na etapa 1.

## 3.2 Cartas de controle para variáveis

Variáveis são características de qualidade que são mensuráveis, como por exemplo: o diâmetro de um rolamento, uma resistência elétrica, o tempo de atendimento de um pedido, etc. Muitos processos têm características mensuráveis, assim há um amplo espaço para o uso das cartas para variáveis.

As cartas para variáveis, mais especificamente, as cartas para  $\bar{x}$  (média) e  $R$  (amplitude) representam a aplicação clássica de controle de processo.

Uma medição (por exemplo:  $\ell = 16,54$ ) contém muito mais informação do que a simples classificação da peça como “dentro ou fora de especificação”. Obter um valor medido é mais caro do que simplesmente classificar uma peça como boa/ruim. Contudo, as medições fornecem mais informações e, portanto, exigem uma amostra menor. Assim, o custo total de amostragem pode ser menor.

Outra vantagem é que, como as cartas de controle para variáveis exigem uma amostragem pequena, o lapso de tempo entre a produção das peças e a ação corretiva pode ser encurtado.

Quando se usa variáveis, a análise do desempenho do processo pode ser feita mesmo se todas as unidades estão dentro dos limites de especificação. Isso é importante na busca da melhoria contínua e torna as cartas de variáveis uma ferramenta de controle mais poderosa do que as cartas de atributos.



### 3.2.1 Introdução às cartas de variáveis

O controle estatístico de variáveis é realizado monitorando-se duas cartas de controle simultaneamente. A justificativa para o monitoramento simultâneo da tendência central e da variabilidade do processo é apresentada na seção 3.2.1.1.

#### 3.2.1.1 Distribuição de probabilidade

As variáveis podem seguir vários tipos de distribuições de probabilidade, como por exemplo as distribuições apresentadas na Figura 3.10:

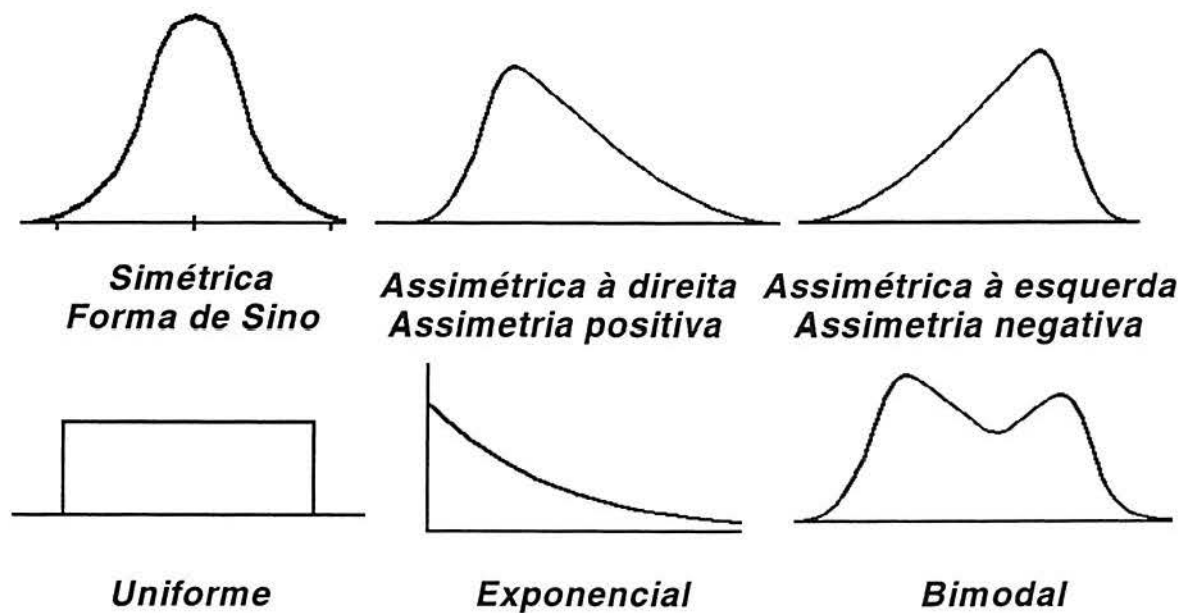


Figura 3.10 Distribuição de probabilidade dos valores individuais.

Existem vários tipos de distribuição, sendo que a mais típica é a distribuição Normal. Quando a variação de uma característica da qualidade é gerada pela soma de um grande número de erros infinitesimais independentes devido a diferentes fatores, a distribuição da característica de qualidade se torna, em muitos casos, aproximadamente uma distribuição Normal (Kume, 1993).

As distribuições de probabilidade são definidas por um parâmetro de localização e outro de variabilidade, como se pode visualizar no exemplo: sejam os dados de três amostras distintas apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Dados de três amostras distintas.

Amostras	Dados	Localização ( $\bar{x}$ )	Variabilidade ( $\bar{R}$ )
A	10 12 14 16 18	$\bar{x} = 14$	$\bar{R} = 8$
B	22 24 26 28 30	$\bar{x} = 26$	$\bar{R} = 8$
C	6 10 14 18 22	$\bar{x} = 14$	$\bar{R} = 16$

Uma variável pode sofrer alteração tanto na sua média quanto na sua variabilidade.

Na Figura 3.11, pode-se visualizar que:

- da amostra A para B muda a tendência central, mas a variabilidade é constante;
- da amostra A para C muda a variabilidade, mas a tendência central é constante;
- da amostra B para C muda a tendência central e a variabilidade.

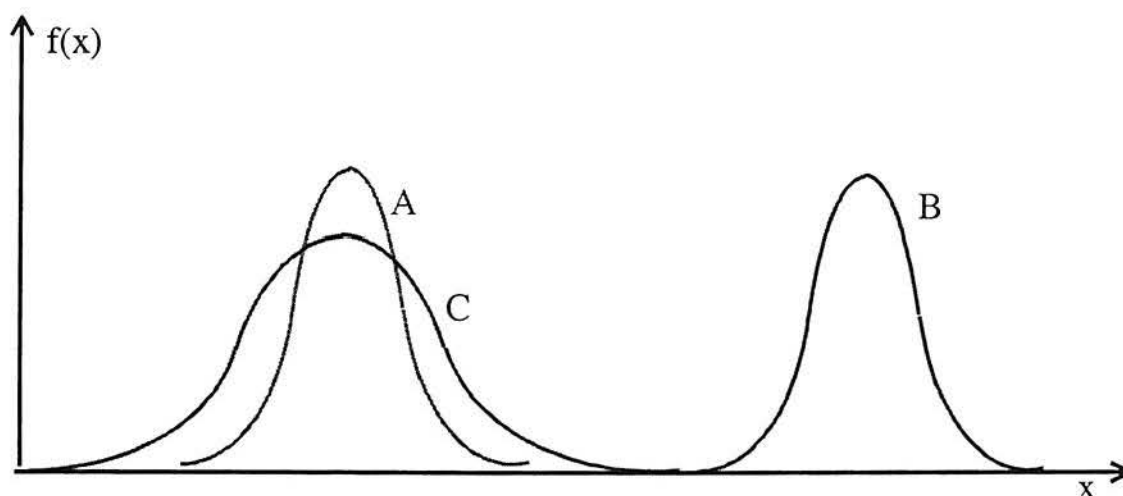


Figura 3.11 Distribuição de probabilidade de três amostras distintas.

Como visto na Figura 3.11, uma causa especial pode atuar em um processo alterando a tendência central ou a variabilidade do processo. Logo, é necessário monitorar duas cartas simultaneamente: a carta de média para detectar quando a tendência central do processo se altera e a carta de amplitude para detectar a mudança na variabilidade do processo.

Como visto, as variáveis podem seguir vários tipos de distribuição de probabilidade, o que dificultaria os cálculos dos limites de controle. No entanto, a maioria das aplicações do controle estatístico do processo utiliza o teorema do limite central que será apresentado na seção 3.2.1.2.

### 3.2.1.2 Teorema do limite central

O teorema do limite central indica que a soma (e, por conseguinte, a média) de  $n$  valores individuais tende a seguir o modelo Normal, independentemente da distribuição de probabilidade dos valores individuais.

A aproximação melhora na medida em que  $n$  aumenta. Se as distribuições dos valores individuais não forem muito diferentes da Normal, basta  $n = 4$  ou  $5$  para se obter uma boa aproximação.

Se as distribuições dos valores individuais forem radicalmente diferentes da Normal, então será necessário  $n = 15$  ou mais para se obter uma boa aproximação pela Normal.

Na Figura 3.12, pode ser visto um desenho esquemático do teorema do limite central.

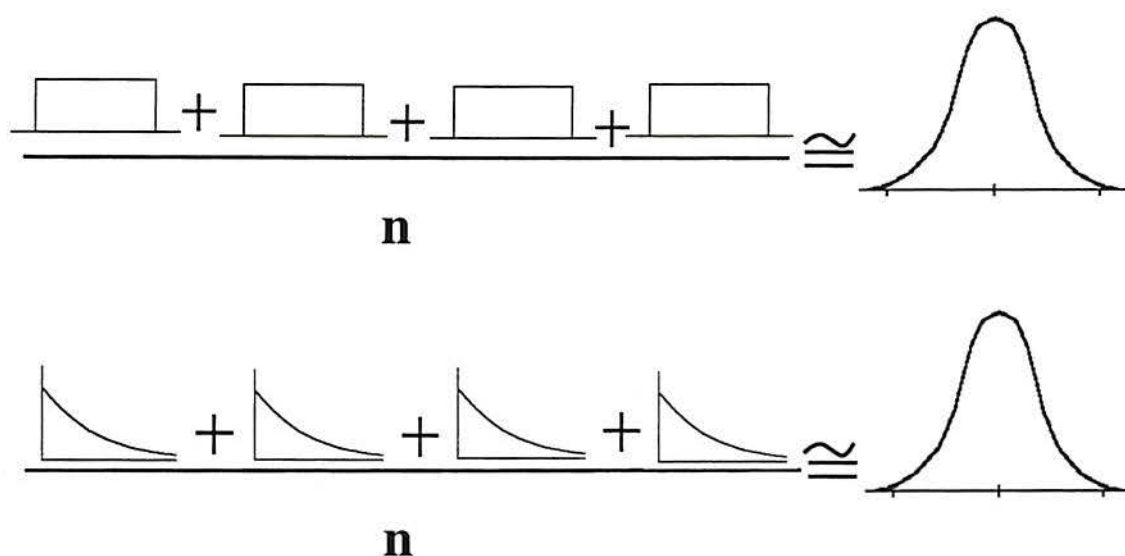


Figura 3.12 Teorema do limite central.

O teorema do limite central é básico para a maioria das aplicações do controle estatístico da qualidade. O controle estatístico do processo, em geral, trabalha com a média das amostras, pois independente da distribuição dos valores individuais, a média desses valores irá seguir aproximadamente a distribuição Normal.

Segundo Pitt (1994), a distribuição Normal é uma teoria básica para o desenvolvimento das cartas de controle e é a principal ferramenta do controle estatístico de processos.



A partir do teorema do limite central, sabe-se que a distribuição amostral das médias apresenta os seguintes parâmetros:

$$\text{eq. 3.1} \quad \text{Média: } \bar{\bar{x}} = \mu$$

onde:  $\bar{\bar{x}}$  representa a média das médias amostrais;

$\mu$  representa a média dos valores individuais da população.

$$\text{eq. 3.2} \quad \text{Desvio-padrão: } \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

onde:  $\sigma_{\bar{x}}$  representa o desvio-padrão das médias amostrais;

$\sigma$  representa o desvio-padrão dos valores individuais da população;

$n$  representa o tamanho da amostra.

Como pode ser visto na Figura 3.13, a média das médias amostrais é igual a média dos valores individuais e o desvio-padrão das médias é menor do que o desvio-padrão dos valores individuais na razão de  $1/\sqrt{n}$ .

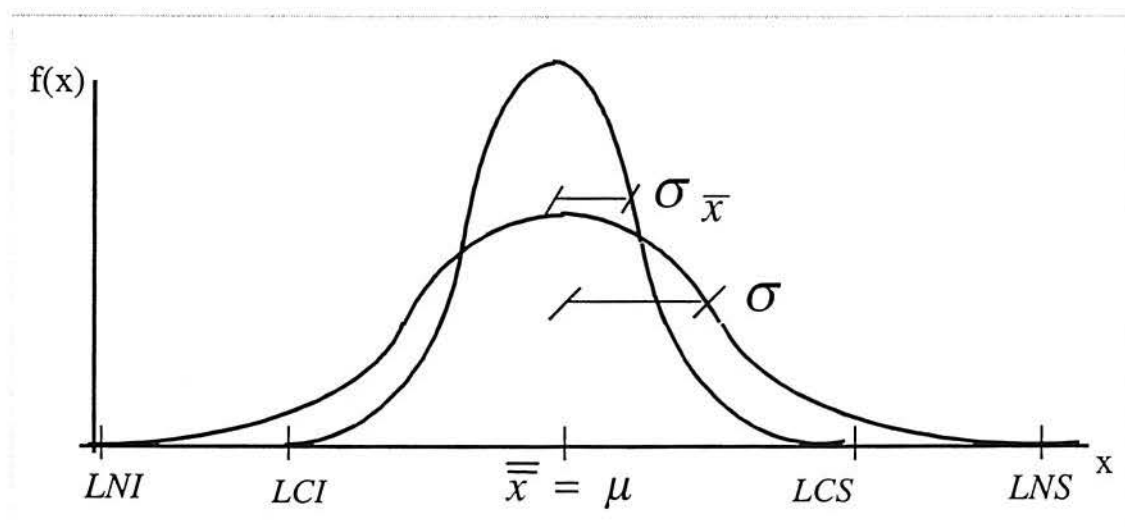


Figura 3.13 Distribuição de probabilidade dos valores individuais versus distribuição de probabilidade das médias.

Os limites da distribuição dos valores individuais são chamados de limites naturais e os limites da distribuição de probabilidade das médias são chamados de limites de controle. Na verdade, esses limites são intervalos de confiança em torno da média, conforme será visto no tópico 3.2.1.3.

### 3.2.1.3 Intervalos de confiança

Como a análise do processo é realizada através de amostragem, a estimativa da média e da variabilidade do processo é realizada através de uma estrutura intervalar que proporciona um intervalo no qual se admite que esteja a verdadeira média e variabilidade populacional.

Como não se sabe ao certo onde estará o verdadeiro parâmetro populacional, deve ser usada uma atribuição probabilística do intervalo em que o verdadeiro valor possa estar. Esse intervalo chama-se intervalo de confiança, e a confiança associada é  $1 - \alpha$  onde  $\alpha$  é a probabilidade do erro.

Um intervalo de confiança de  $100(1-\alpha)\%$  é estabelecido a partir de dois limites, tais que a probabilidade do verdadeiro valor do parâmetro estar incluído dentro do intervalo é  $100(1-\alpha)\%$ .

No CEP, usualmente utiliza-se intervalos de confiança de 99,73%. Por exemplo, para construir um intervalo de confiança de 99,73% para a média, é necessário achar os limites  $L$  e  $U$ , tais que:

$$\text{eq. 3.3} \quad P\{L \leq \mu \leq U\} = 99,73\%$$

Os limites de confiança de  $100(1-\alpha)\%$  são calculados usando-se a distribuição Normal.

$$\text{eq. 3.4} \quad \bar{\bar{x}} - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{\bar{x}} + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

onde:  $Z_{\alpha/2}$  representa a variável reduzida padronizada correspondente à probabilidade do erro  $\alpha/2$ .

Para intervalos de confiança de 99,73% tem-se:

$$\text{eq. 3.5} \quad \bar{\bar{x}} - 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{\bar{x}} + 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{ou} \quad \bar{\bar{x}} - 3\sigma_{\bar{x}} \leq \mu \leq \bar{\bar{x}} + 3\sigma_{\bar{x}}$$

A Figura 3.14 apresenta a distribuição de probabilidade das médias e o intervalo de confiança de 99,73% utilizados como limites de controles nas cartas de controle.

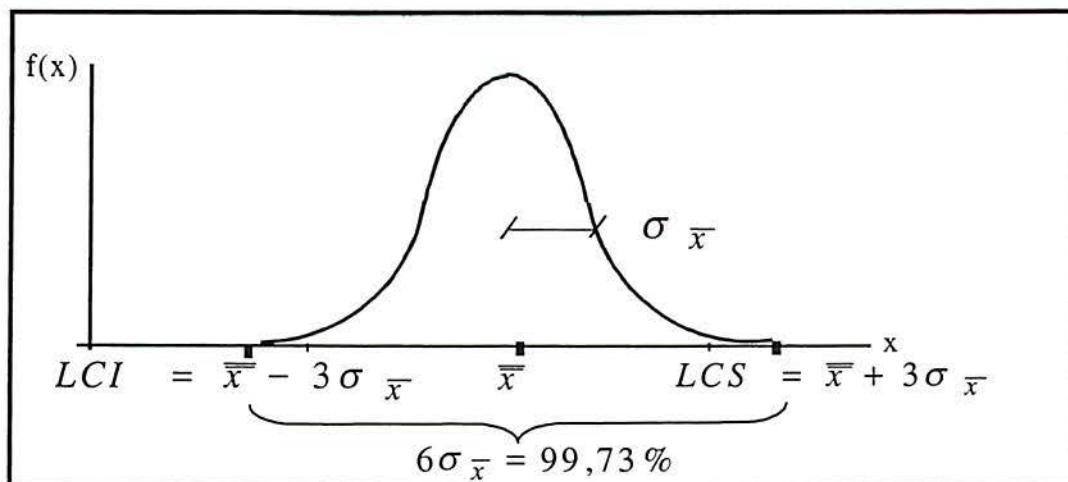


Figura 3.14 Distribuição de probabilidade das médias.

A aplicação mais tradicional do controle estatístico do processo, as cartas de controle de média ( $\bar{x}$ ) e amplitude ( $R$ ), são detalhadas no tópico 3.2.2.

### 3.2.2 Cartas de controle para a média

Os passos para a implantação das cartas de controle são os seguintes:

Passo 1: Coleta de dados;

Passo 2: Cálculo dos limites de controle;

Passo 3: Interpretação da estabilidade do processo;

Passo 4: Interpretação da capacidade do processo.

#### 3.2.2.1 Coleta de dados

Os dados devem ser coletados em pequenos subgrupos (amostras) de tamanho constante. Vale lembrar que quanto maior o tamanho da amostra maior a sensibilidade das cartas, ou seja, elas detectam melhor pequenas mudanças no processo. No entanto, aumentar o tamanho da amostra representa aumentar o custo de amostragem. Em geral, 3 a 6 peças consecutivas formam uma amostra adequada.

As peças dentro de um subgrupo são produzidas em condições muito similares e, portanto, a variabilidade dentro de cada subgrupo será primariamente devido às causas comuns de variabilidade.



A idéia de coletar subgrupos na seqüência de tempo é interessante, pois provavelmente os produtos produzidos na seqüência são similares entre si e a variabilidade presente é devido a causas comuns.

Os subgrupos devem ser coletados a uma freqüência periódica, por exemplo, 1 subgrupo a cada 15 minutos, ou 2 subgrupos por lote, etc...

A freqüência de amostragem deve ser definida de forma que exista uma chance potencial de mudança dos resultados (causa especial) de um subgrupo para o outro. A freqüência das amostras deve ser selecionada de forma a maximizar a chance de ocorrer diferenças entre amostras.

A definição de tamanho de amostra e freqüência de amostragem mais econômicos poderiam ser definidas apenas se forem conhecidos a estabilidade do processo, os custos de amostragem, os custos de investigação e correção de causas especiais e o custo de fabricar peças fora de especificação.

### **Desenho das cartas de controle**

O formulário da carta de controle, seja em papel ou em planilha/janelas de computador, deve conter:

- a) espaço para a completa identificação da característica que está sendo medida;
- b) tabela para as anotações dos valores individuais medidos, com espaço para cálculo da média e da amplitude de cada subgrupo;
- c) espaço para a carta de médias;
- d) espaço para a carta de amplitudes.

### **Exemplo da carta de controle para média ( $\bar{X}$ ) e amplitude ( $R$ )**

Na Tabela 3.3, apresentam-se os dados do exemplo da fresa.

Tabela 3.3 Dados do exemplo da fresa: identificação mais tabela de dados.

Nome da parte		Retentor					Especificações					30 a 90 microns				
Número da parte		9983-5					Instrumento					Micrômetro				
Operação		Dobra superior					Amostra/Freq.					5 / 2 horas				
Máquina		030					Unidade					microns				
Característica		Fresa					Carta No.					01				
Data	6/3					7/3					8/3					
Hora	8	10	12	14	16	8	10	12	14	16	8	10	12	14	16	
Operador	A	A	A	B	B	A	A	A	B	B	A	A	A	B	B	
1	65	75	80	65	80	75	80	70	85	65	75	85	70	70	75	
2	70	70	70	65	60	70	75	65	85	65	60	65	75	65	80	
Medidas	3	75	80	70	65	80	60	65	75	75	65	75	75	85	85	
4	60	90	80	80	80	85	75	65	65	80	85	75	70	60	80	
5	80	70	80	65	75	75	70	85	80	60	90	80	70	75	90	
Soma	350	385	380	340	375	365	365	360	390	335	385	380	360	355	410	
Média	70	77	76	68	75	73	73	72	78	67	77	76	72	71	82	
Amplitude	20	20	10	15	20	25	15	20	20	20	30	20	5	25	15	

### 3.2.2.2 Cálculo dos limites de controle

O cálculo preliminar dos limites de controle pode ser feito após a coleta de umas 20 ou 30 amostras (subgrupos) sem indícios de uma situação fora do controle. Ou seja, coleta-se de 20 a 30 amostras, calcula-se os limites de controle para a média e amplitude e compara-se essas mesmas amostras com os limites de controle calculados.

Caso haja pontos fora dos limites de controle, deve-se retirar as amostras correspondentes e recalculá-los os limites de controle. Esse processo iterativo acontece no início, pois os limites de controle devem estar associados apenas às causas comuns de variabilidade. Vale ressaltar que os pontos são eliminados do cálculo dos limites de controle, mas não dos gráficos de controle.

A fim de calcular os limites de controle, inicialmente calcula-se a amplitude e a média para cada amostra. Logo após, calcula-se a média das amplitudes e a média das médias das amostras como segue:

$$\text{eq. 3.6} \quad \bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_K}{K}$$

$$\text{eq. 3.7} \quad \bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_K}{K}$$

onde  $\bar{x}_i$  e  $R_i$  representam a média e a amplitude da amostra  $i$ .

Como pode-se observar, a variabilidade é estimada usando-se a média das amplitudes dentro de cada amostra para garantir que ela esteja associada apenas às causas comuns.

Logo, não está correto estimar a variabilidade usando a fórmula tradicional de desvio-padrão (eq. 3.8) aplicada sobre o conjunto de todos os dados, pois desta forma a estimativa da variabilidade poderia estar associada com causas comuns (dentro das amostras) e causas especiais (entre amostras).

$$eq. 3.8 \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{\bar{x}})^2}{mn - 1}}$$

onde:  $x_{ij}$  representa um valor individual;

$m$  representa o número de amostras;

$n$  representa o tamanho das amostras.

Uma vez calculados  $\bar{\bar{x}}$  e  $\bar{R}$ , calcula-se os limites de controle das médias considerando-se a extensão de seis desvios-padrão das médias (três para cada lado), que segundo a distribuição Normal compreende 99,73% dos valores de médias amostrais. A fórmula resulta:

$$eq. 3.9 \quad LC = \bar{\bar{x}} \pm 3\sigma_{\bar{x}}$$

onde a variabilidade das médias é estimada a partir da variabilidade dos valores individuais usando  $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ . Substituindo esta expressão na eq. 3.9, resulta:

$$eq. 3.10 \quad LC = \bar{\bar{x}} \pm \frac{3\sigma}{\sqrt{n}}$$

onde a variabilidade dos valores individuais é estimada a partir da média das amplitudes dos subgrupos usando  $\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2}$  e  $d_2$  é uma constante que depende do tamanho da amostra, cujos valores encontram-se na Tabela 3.4.

Substituindo-se essa expressão na eq. 3.10, resulta:



$$eq. 3.11 \quad LC = \bar{\bar{x}} \pm \frac{3}{\sqrt{n}} \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Substituindo-se  $A_2 = \frac{3}{\sqrt{n} d_2}$  na eq. 3.11, tem-se os limites de controle para as médias:

$$eq. 3.12 \quad LCS = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}$$

$$eq. 3.13 \quad LCI = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$$

onde  $A_2$  é uma constante que depende do tamanho da amostra, cujos valores são apresentados na Tabela 3.4.

Os limites de controle para as amplitudes são calculados como segue:

$$eq. 3.14 \quad LC = \bar{R} \pm 3\sigma_R$$

onde  $\sigma_R = d_3 \sigma = d_3 \frac{\bar{R}}{d_2}$ .

Substituindo-se essa expressão na eq. 3.14, tem-se:

$$eq. 3.15 \quad LCS = \bar{R} + 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2}$$

$$eq. 3.16 \quad LCI = \bar{R} - 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Substituindo  $D_3 = 1 - 3\frac{d_3}{d_2}$  e  $D_4 = 1 + 3\frac{d_3}{d_2}$  nas eq. 3.15 e eq. 3.16, tem-se os limites de controle para as amplitudes:

$$eq. 3.17 \quad LCS = D_4 \bar{R}$$

$$eq. 3.18 \quad LCI = D_3 \bar{R}$$

onde  $D_4$  e  $D_3$  são constantes que dependem do tamanho da amostra, cujos valores são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Valores das constantes  $D_4$ ,  $D_3$ ,  $d_2$  e  $A_2$ .

$n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
$D_4$	3,27	2,57	2,28	2,11	2,00	1,92	1,86	1,82	1,78	1,65	1,59
$D_3$	0	0	0	0	0	0,08	0,14	0,18	0,22	0,35	0,42
$d_2$	1,13	1,69	2,06	2,33	2,53	2,70	2,85	2,97	3,08	3,47	3,74
$A_2$	1,88	1,02	0,73	0,58	0,48	0,42	0,37	0,34	0,31	0,22	0,18

Para o exemplo da Tabela 3.3, obteve-se  $\bar{\bar{x}} = 73,8$ ;  $\bar{R} = 18,7$ . Assim os limites de controle resultam:

Médias:

$$eq. 3.19 \quad LCS = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} = 73,8 + 0,58 \times 18,7 = 84,57$$

$$eq. 3.20 \quad LCI = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} = 73,8 - 0,58 \times 18,7 = 63,03$$

Amplitudes:

$$eq. 3.21 \quad LCS = D_4 \bar{R} = 2,11 \times 18,7 = 39,47$$

$$eq. 3.22 \quad LCI = D_3 \bar{R} = 0,00 \times 18,7 = 0,00$$

Uma vez calculados os limites de controle, eles servirão para o monitoramento da produção futura. Ou seja, plota-se os limites de controle respectivamente em um gráfico de média e desvio-padrão e a cada amostra coletada ao longo do tempo, plota-se a média e o desvio-padrão no respectivo gráfico. Como pode ser visto nas Figura 3.15 e Figura 3.16, o processo desse exemplo é estável ao longo do tempo.

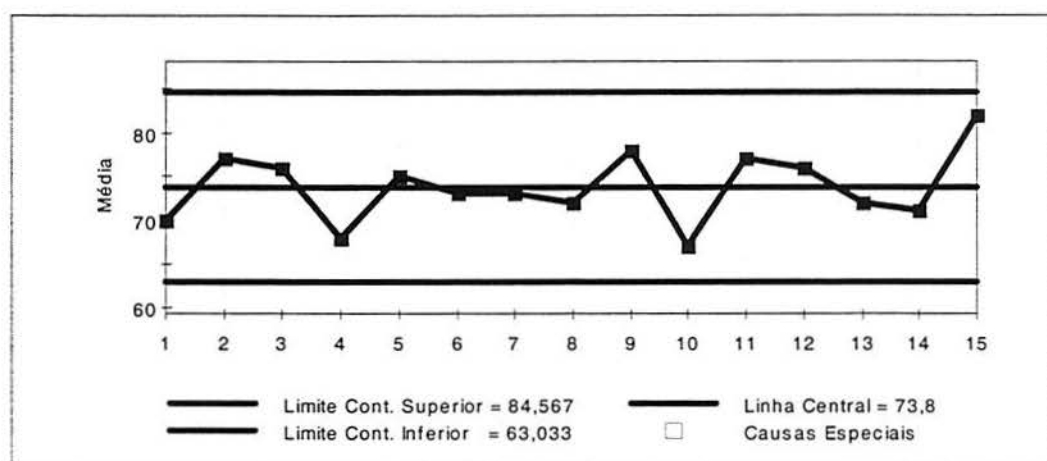


Figura 3.15 Exemplo de carta de controle para a média.

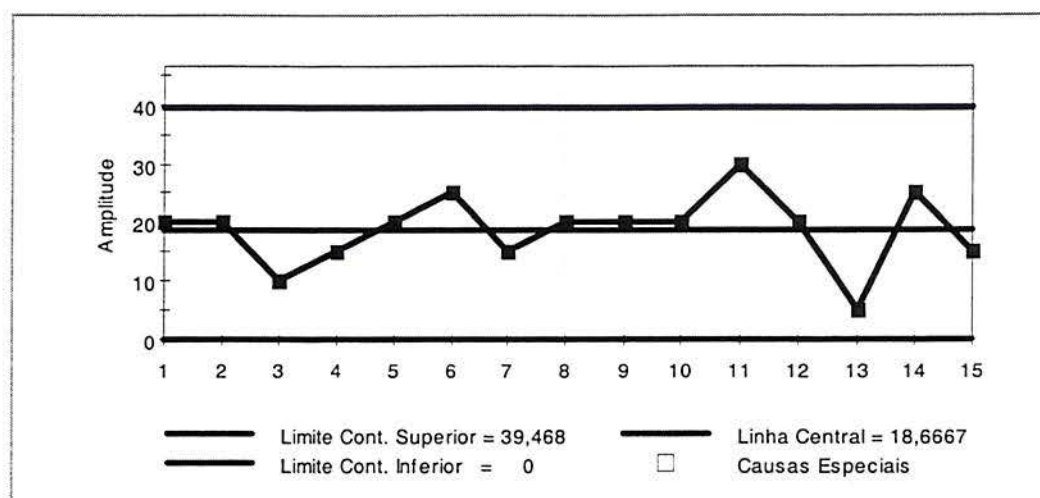


Figura 3.16 Exemplo de carta de controle para a amplitude.

### 3.2.2.3 Interpretação da estabilidade do processo

O gráfico de médias monitora a variabilidade entre as médias amostrais ao longo do tempo e o gráfico de amplitude monitora a variabilidade dentro da amostra, ou seja, a variabilidade em um determinado período tempo.

O monitoramento das cartas de controle representa um teste de hipótese a cada nova amostra coletada. A hipótese que está sendo testada a cada amostra coletada é de que a média ou a variabilidade do processo continuam as mesmas (processo estável), tendo como hipótese alternativa de que elas mudaram devido à presença de uma causa especial (processo instável).

Os limites de controle são limites de confiança calculados de forma que, se o processo não mudou (não há causas especiais atuando), a probabilidade de uma amostra cair dentro dos limites é de 99,73% e fora dos limites é de 0,27%. Logo, caso a amostra coletada esteja dentro dos limites de controle (limites de confiança) conclui-se que os parâmetros do processo (média e amplitude) permanecem os mesmos. Caso apareça uma amostra fora dos limites de controle, a probabilidade dessa amostra pertencer a esse processo é muito pequena, logo há uma forte evidência de que o processo mudou (média ou desvio) devido à presença de causas especiais.

Antes de investigar uma causa especial, é interessante verificar se não houve erro na plotagem do ponto ou problemas no sistema de medição.

Se os pontos plotados nas cartas apresentam um comportamento não aleatório ou sistemático também são um forte indício de causa especial.



## Padrões

Além de verificar pontos fora dos limites, também é importante investigar eventuais padrões não aleatórios na sequência de pontos, como por exemplo os padrões que aparecem na Figura 3.17. A observação de padrões pode disparar uma ação sobre o sistema antes mesmo que um ponto apareça fora dos limites de controle. Alguns padrões podem ser favoráveis e podem fornecer a pista para eventuais melhorias permanentes no processo.

## Corridas

As seguintes constatações indicam a presença de uma causa especial: a) sete pontos em sequência acima (ou abaixo) da linha central e b) sete pontos em sequência ascendente (ou descendente). A correta interpretação das cartas de controle exige conhecimentos estatísticos e conhecimentos técnicos a respeito do processo estudado.

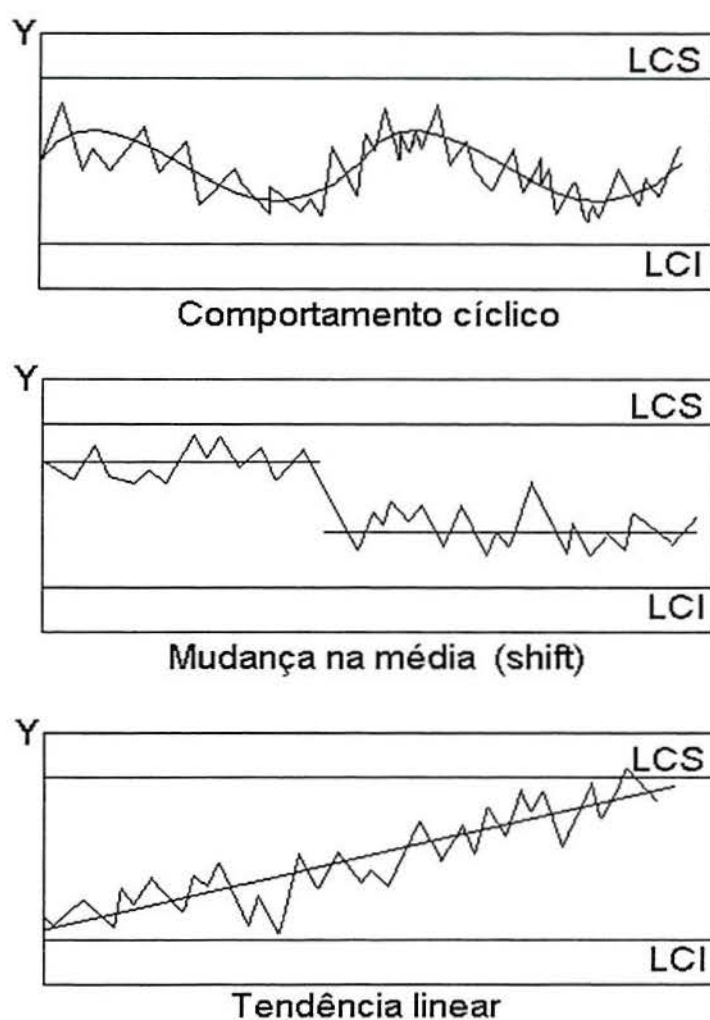


Figura 3.17 Exemplo de padrões e corridas não aleatórios no processo.

## Detecção e correção de causas especiais

Cada ponto fora do controle deve gerar uma análise das condições operacionais em busca da causa respectiva. Os resultados estatísticos dão partida para a tarefa de análise, mas a explicação do que está acontecendo reside no próprio processo e nas pessoas envolvidas.

A solução do problema é o passo mais difícil e que consome maior tempo. É preciso paciência, intuição e experiência para gradualmente eliminar, uma a uma, as causas especiais.

Técnicas de solução de problemas como a análise de Pareto ou os diagramas de causa e efeito podem ajudar na análise. Os problemas mais complexos podem exigir o uso de projeto de experimentos e outras ferramentas estatísticas.

## Reavaliação dos limites de controle

Se ações de melhoria estão sendo tomadas, o processo deve apresentar um desempenho mais consistente, com redução da variabilidade. Como pode ser visto na Figura 3.18, caso os limites de controle não sejam estreitados, as cartas de controle consideram causas especiais como sendo causas comuns, ou seja, perde-se a chance de melhorar o processo agindo sobre essas causas especiais.

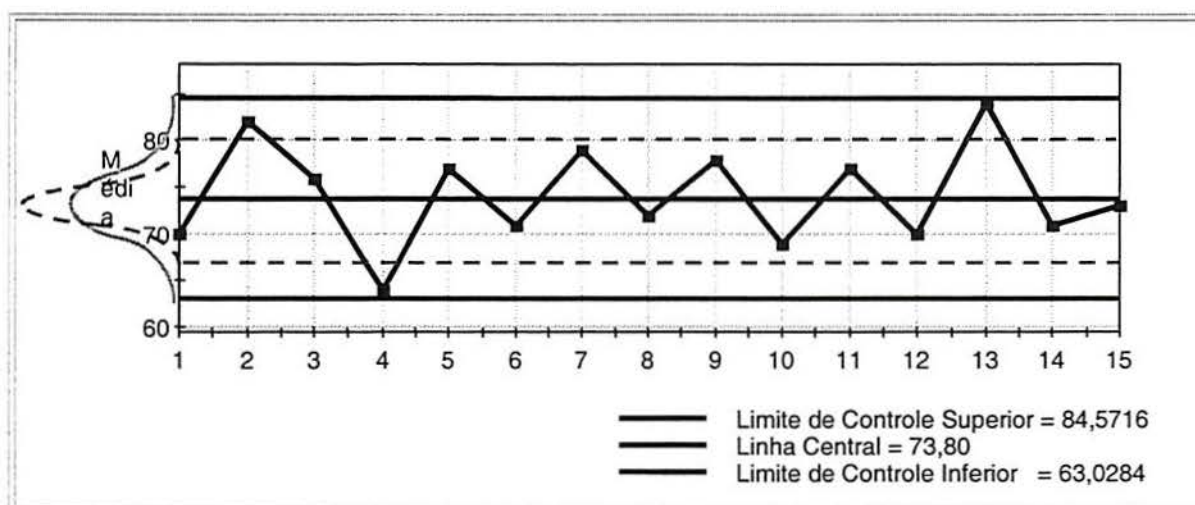


Figura 3.18 Reavaliação dos limites de controle.

Assim, de tempos em tempos, os limites de controle devem ser recalculados e, sempre que houver evidências para tanto, estreitados. Dessa forma, as cartas de controle continuarão servindo como uma ferramenta eficaz no gerenciamento da variabilidade,

separando as causas comuns das causas especiais e auxiliando na busca da melhoria contínua. O controle estatístico do processo deve ser entendido como uma atividade dinâmica.

### 3.2.2.4 Interpretação da capacidade do processo

Uma vez que o processo esteja em controle estatístico, ainda permanece a questão se o processo é ou não capaz, isto é, o resultado satisfaz às exigências dos clientes?

A avaliação da capacidade do processo só inicia após a eliminação das causas especiais. Assim, a capacidade do processo está associada com as causas comuns de variabilidade.

Na Figura 3.19, tem-se um processo estável ao longo do tempo. O mesmo processo pode ser considerado capaz ou não dependendo das especificações do cliente.

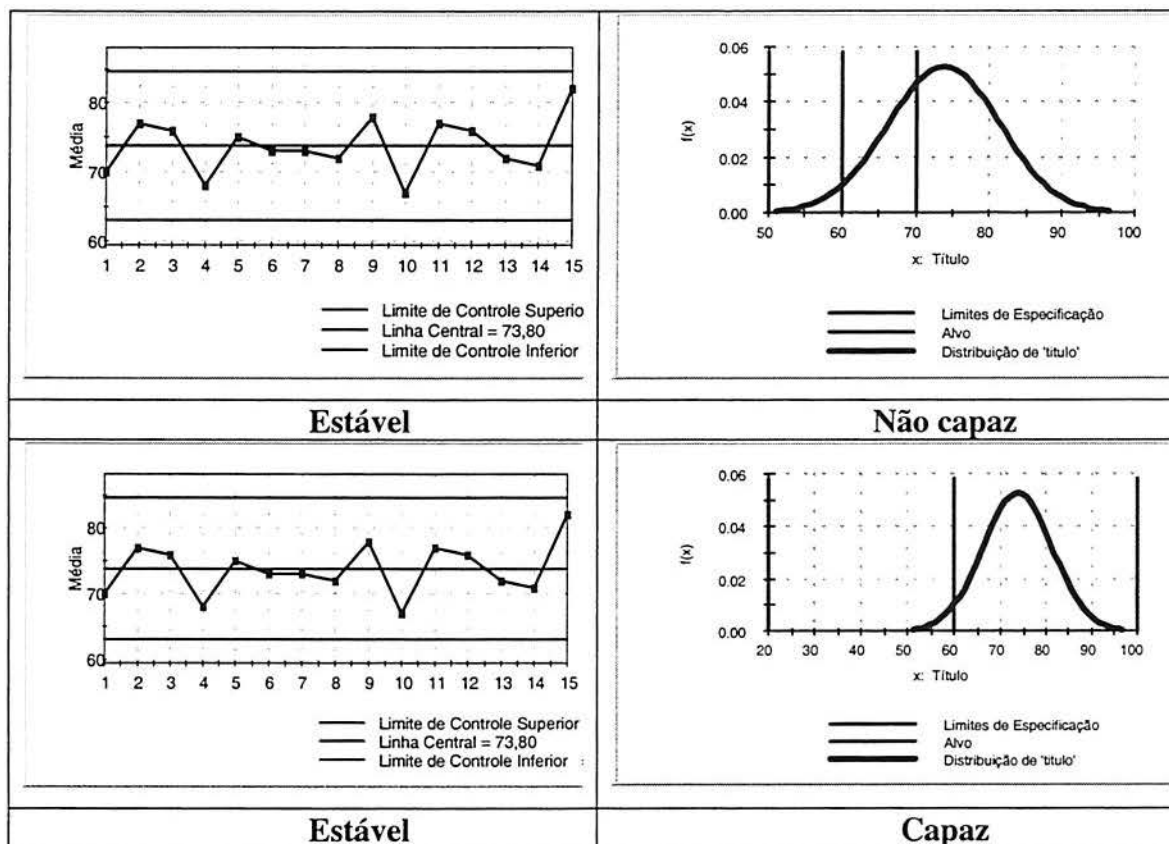


Figura 3.19 Processo capaz e não capaz dependendo das especificações.

Na Figura 3.20 tem-se um processo instável que, com a eliminação das causas especiais, se torna estável ao longo do tempo e capaz de atender as especificações.



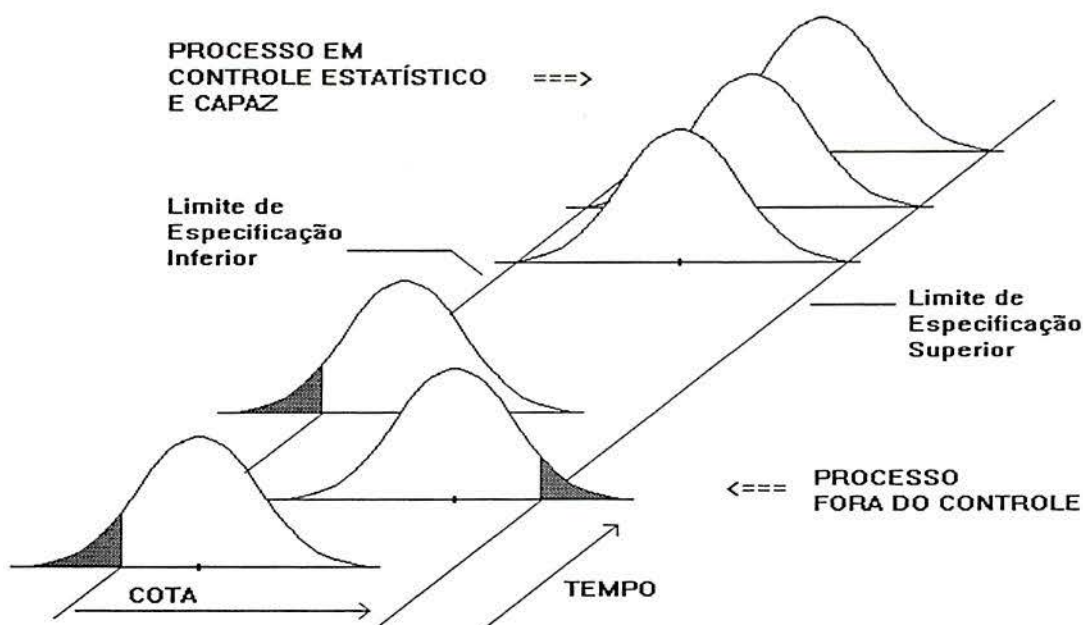


Figura 3.20 Processo estável e capaz com o passar do tempo.

A avaliação da capacidade do processo é realizada com a distribuição dos valores individuais, pois o cliente espera que todas as peças produzidas estejam dentro das especificações. Dessa forma, é necessário conhecer a distribuição de probabilidade dos valores individuais da variável que está sendo monitorada e estimar a média, a variabilidade e os limites naturais do processo.

Para conhecer a distribuição de probabilidade da variável deve-se fazer um histograma dos dados (valores individuais) coletados.

## Histograma

O histograma é uma forma gráfica que permite verificar o tipo de distribuição que as variáveis seguem. Para montar um histograma, inicialmente divide-se o conjunto de dados em classes (ou categorias) e verifica-se o número de indivíduos pertencentes a cada classe, ou seja, a frequência de cada classe. Organiza-se as classes e a frequência de cada classe em uma tabela de frequência. Nesse caso, os detalhes originais dos dados são perdidos, mas a vantagem está em observar aspectos globais do problema.

A Tabela 3.5 mostra um exemplo da distribuição de frequência de 50 observações da largura de peças cerâmicas.

Tabela 3.5 Tabela de frequência da espessura de peças cerâmicas.

Espessura	Frequência
12,50 a 13,49	3
13,50 a 14,49	8
14,50 a 15,49	15
15,50 a 16,49	13
16,50 a 17,49	9
17,50 a 18,49	2

Os limites tais como 12,50 a 13,49 são chamados de intervalos de classe. O número menor (12,49) é o limite inferior da classe; e o maior (13,49) é o limite superior da classe. Em alguns casos, pode-se usar intervalos abertos, do tipo 13,49 ou menor; 17,50 ou maior.

A amplitude dos intervalos de classe, quando for constante em todos os intervalos, é calculada fazendo-se a diferença entre dois limites inferiores ou dois limites superiores sucessivos. Caso contrário, tem-se uma amplitude variável.

Para o exemplo da Tabela 3.5, a amplitude é:

$$\text{eq. 3.23} \quad \text{Amplitude} = 16,49 - 15,49 = 15,49 - 14,49 = 1$$

O ponto médio de uma classe é obtido somando-se o limite inferior ao superior e dividindo por dois. Assim, o ponto médio do intervalo é:

$$\text{eq. 3.24} \quad \text{Ponto médio} = 13,50 \text{ a } 14,49 \text{ é } (13,50 + 14,49) / 2 = 14,00.$$

### Passos para elaborar um histograma

Para elaborar um histograma recomenda-se seguir os seguintes passos:

- determina-se o maior e menor valor do conjunto de dados;
- define-se o limite inferior da primeira classe (*LI*), que deve ser igual ou ligeiramente inferior ao menor valor das observações;
- define-se o limite superior da última classe (*LS*), que deve ser igual ou ligeiramente superior ao maior valor das observações;
- define-se o número de classes (*K*), que pode ser calculado usando  $K = \sqrt{n}$  e deve estar compreendido entre 5 a 20;
- conhecido o número de classes, define-se a amplitude de cada classe dividindo-se a amplitude total pelo número de classes:  $a = (LS - LI) / K$ ;

f) conhecida a amplitude das classes, define-se os limites inferior e superior para cada classe, por exemplo, para a 1ª classe: *lim. inf.* = *LI*; *lim. sup.* = *LI* + *a*;

g) calcula-se a frequência de cada classe, ou seja, o número de observações que caem em cada classe, e completa-se a tabela de frequência;

h) recomenda-se que os limites de cada classe sejam definidos com uma precisão maior do que as próprias observações, para evitar indecisões na classificação, por exemplo: *obs* = 8,5 9,3 9,9 10,1 10,5 *limites das classes* = 8,55 a 8,95; 8,95 a 9,35; etc.

Como pode-se ver Figura 3.21, o gráfico do histograma consiste de um conjunto de retângulos que tem: a) a base sobre um eixo horizontal com centro no ponto médio e largura igual a amplitude do intervalo de classes e b) a área proporcional às frequências das classes.

Se todos os intervalos tiverem a mesma amplitude, as alturas dos retângulos serão proporcionais às frequências das classes, e então costuma-se desenhar as alturas numericamente iguais a essas frequências.

Alternativamente ao histograma, também pode ser desenhado um polígono de frequência. Um polígono de frequência, como pode ser visto na Figura 3.21, é um gráfico obtido ligando-se os pontos médios dos topos dos retângulos de um histograma.

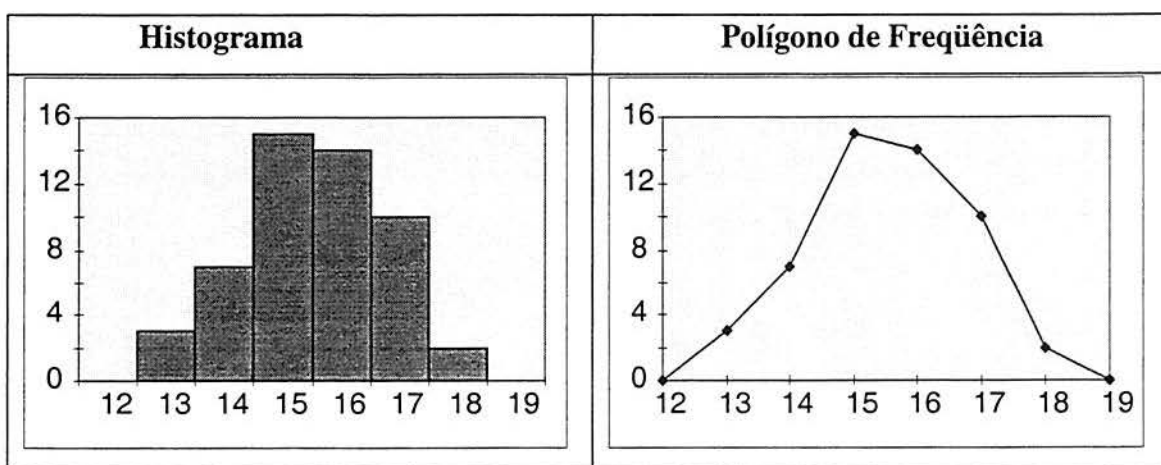


Figura 3.21 Exemplo de histograma e polígono de frequência.

### Teste gráfico de normalidade

Outra forma de verificar a distribuição das variáveis é através do papel de probabilidade que permite testar graficamente o ajuste de diferentes distribuições de probabilidade.



O papel de probabilidade Normal possui uma escala vertical transformada, de forma que se um conjunto de dados segue a distribuição Normal, suas frequências acumuladas aparecerão dispostas ao longo de uma linha reta.

Caso contrário, quando o modelo Normal não se ajusta bem aos dados, suas frequências acumuladas irão apresentar curvatura quando plotadas no papel de probabilidade Normal.

Caso o papel de probabilidade Normal não esteja disponível, há outra alternativa gráfica para verificar o ajuste de um modelo Normal através do teste gráfico de valores teóricos de  $Z$ .

### Passos para elaborar o teste gráfico de valores teóricos de $Z$

Essa alternativa utiliza os valores teóricos de  $Z$  esperados para cada valor ordenado de  $X_{(i)}$ .

Para elaborar o teste gráfico de valores teóricos de  $Z$ , recomenda-se seguir os seguintes passos:

- colocam-se os dados ( $X_{(i)}$ ) em ordem crescente;
- calcula-se a probabilidade acumulada  $F(X_{(i)})$ ;
- obtem-se o valor teórico de  $Z$  a partir de  $F(X_{(i)})$ , usando a tabela da distribuição Normal acumulada;
- plota-se o  $Z_{\text{teórico}} \times X_{(i)}$ ;
- se o ajuste Normal é adequado, os valores plotados devem aparecer seguindo aproximadamente uma linha reta.

Por exemplo, sejam os valores de espessura de peças cerâmicas apresentados na Tabela 3.6. Como pode ser visto na Figura 3.22, os pontos estão aproximadamente dispostos segundo uma linha reta, indicando que os dados provêm de uma população com distribuição Normal.

Tabela 3.6 Valores de  $X_{(i)}$ ,  $F(X_{(i)})$  e  $Z_{\text{teórico}}$  para a espessura.

$i$	$X_{(i)}$	$F(X_{(i)}) = \frac{i-0,5}{n}$	$Z_{\text{teórico}}$	$i$	$X_{(i)}$	$F(X_{(i)}) = \frac{i-0,5}{n}$	$Z_{\text{teórico}}$
1	1,00	0,05	-1,64	6	1,80	0,55	0,13
2	1,22	0,15	-1,04	7	1,87	0,65	0,39
3	1,31	0,25	-0,67	8	2,00	0,75	0,67
4	1,55	0,35	-0,39	9	2,32	0,85	1,04
5	1,62	0,45	-0,13	10	2,50	0,95	1,64

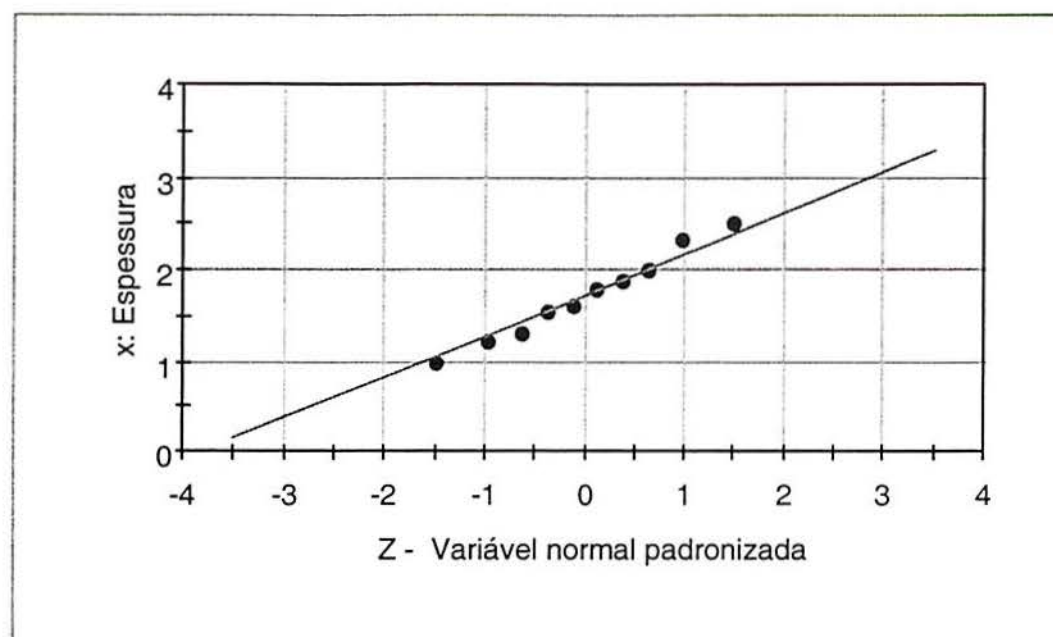


Figura 3.22 Exemplo do teste de normalidade de valores teóricos de Z.

Vale observar que esses dados com tamanho de amostra  $n = 10$  não seriam suficientes para uma análise usando histograma. Mas com a ajuda do teste gráfico de normalidade é possível avaliar se os dados provêm de uma população Normal.

### Cálculo dos limites naturais

Uma vez identificada a distribuição dos valores individuais calcula-se os limites naturais.

Caso a distribuição dos valores individuais seja Normal, os limites naturais são calculados considerando-se a extensão de seis desvios-padrão ( $6\sigma$ ). Dessa forma, os limites naturais compreendem 99,73% dos valores, ou seja, teoricamente 99,73% das peças produzidas estarão dentro dos limites naturais e 0,27% estarão fora dos limites naturais.

Os limites naturais da distribuição Normal são calculados usando a fórmula:

$$\text{eq. 3.25} \quad LNI = \mu - 3\sigma$$

$$\text{eq. 3.26} \quad LNS = \mu + 3\sigma$$

A estimativa do desvio-padrão dos valores individuais ( $\sigma$ ) é obtida a partir da média das amplitudes das amostras usando::

$$\text{eq. 3.27} \quad \hat{\sigma} = \bar{R}/d_2$$

onde  $d_2$  é uma constante que depende do tamanho da amostra, cujos valores encontram-se na Tabela 3.7. Ou a partir do desvio-padrão das amostras usando:

$$\text{eq. 3.28} \quad \hat{\sigma} = \bar{S}/c_4$$

onde  $c_4$  é uma constante que depende do tamanho da amostra, cujos valores encontram-se na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 Valores da constante  $d_2$  e  $c_4$ .

$n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
$d_2$	1,13	1,69	2,06	2,33	2,53	2,70	2,85	2,97	3,08	3,47	3,74
$c_4$	0,80	0,89	0,92	0,94	0,95	0,96	0,965	0,969	0,973	0,982	0,987

Na Figura 3.23, pode-se visualizar os limites naturais de um processo que segue a distribuição Normal.

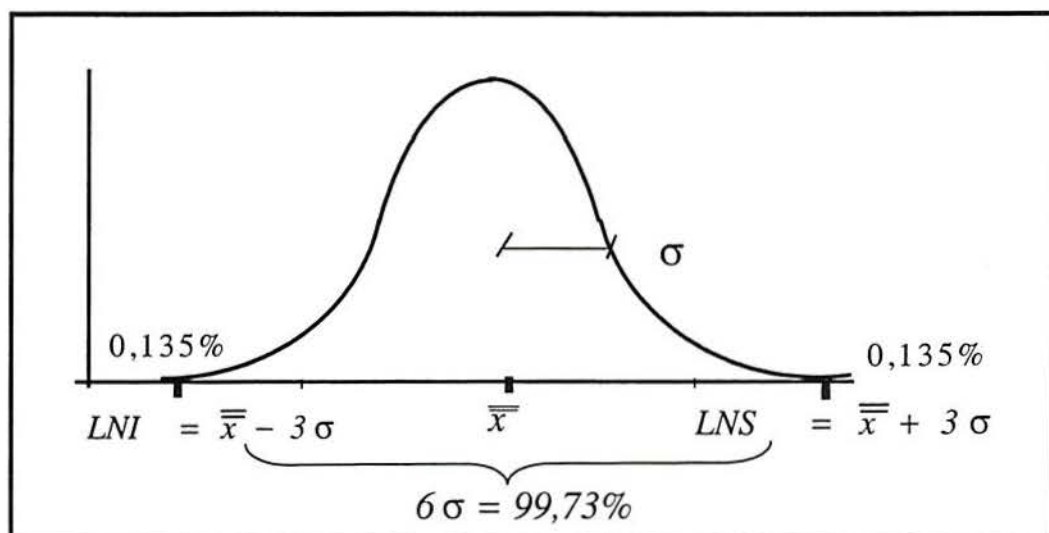


Figura 3.23 Limites naturais da distribuição dos valores individuais.

Na Figura 3.24, apresenta-se o percentual dentro da faixa de dois desvios-padrão ( $\pm 1\sigma$ ), quatro desvios-padrão ( $\pm 2\sigma$ ) e seis desvios-padrão ( $\pm 3\sigma$ ) da distribuição Normal.



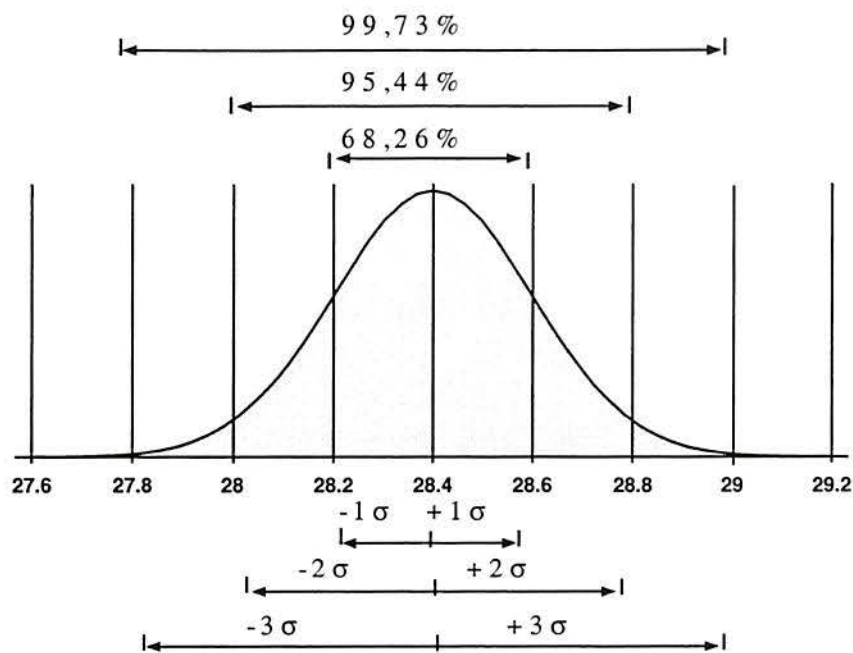


Figura 3.24 Percentuais associados a faixa de  $\pm 1\sigma$ ,  $\pm 2\sigma$  e  $\pm 3\sigma$  da distribuição Normal, para uma população com média 28,4 e desvio-padrão 0,20.

### Índices de capacidade

Muitas vezes é conveniente ter uma maneira simples e quantitativa de expressar a capacidade do processo. Uma maneira é utilizar os índices de capacidade que comparam os limites naturais do processo com a amplitude das especificações exigidas para o processo.

O cálculo dos índices de capacidade é realizado supondo que as variáveis provêm de uma distribuição Normal.

A Figura 3.25 ilustra a situação de processos capaz e não capaz.

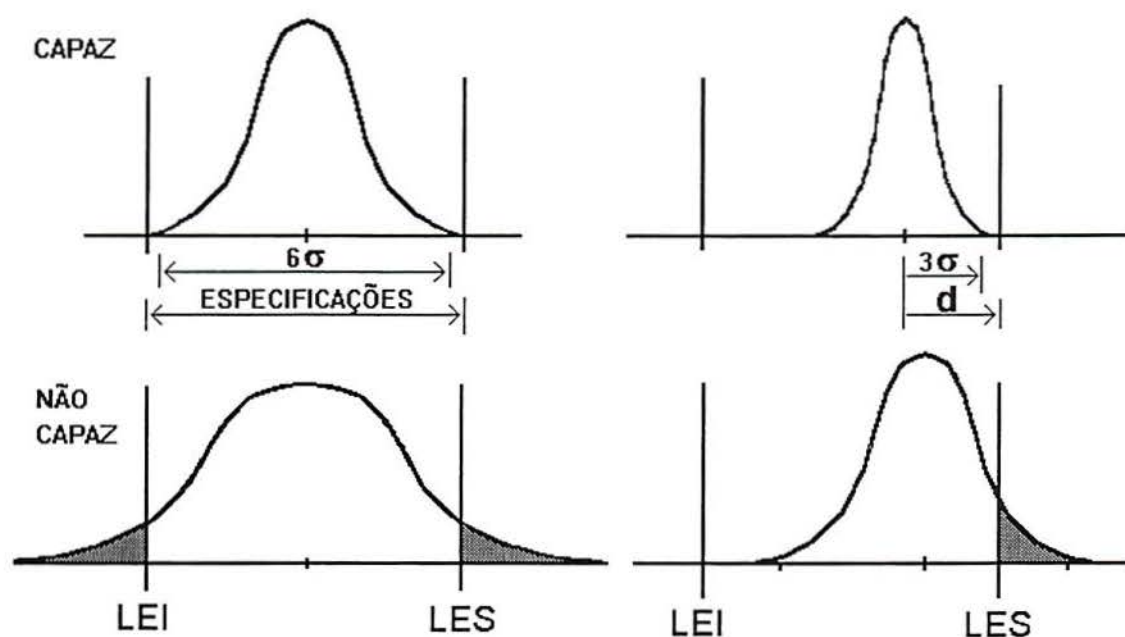


Figura 3.25 Exemplo de processo capaz e não capaz.

Há vários tipos de índice de capacidade. Um índice usado com frequência para avaliação de características do tipo nominal-é-melhor, ou seja, características que possuem um valor alvo a ser atingido e qualquer desvio desse valor alvo é prejudicial, é o  $C_p$  calculado segundo a eq. 3.29:

$$eq. 3.29 \quad C_p = \frac{LES - LEI}{6\hat{\sigma}} = \frac{\text{Especificações}}{\text{dispersão}}$$

O índice  $C_p$  avalia a capacidade potencial do processo, que poderia ser atingida se o processo estivesse centrado.

Conhecidos:  $\bar{R} = 18,7$ ,  $n = 5$ ,  $d_2 = 2,33 \Rightarrow \hat{\sigma} = 18,7 / 2,33 = 8,03$ , o cálculo de  $C_p$  para o exemplo da fresa da Tabela 3.3 seria:

$$eq. 3.30 \quad C_p = \frac{90 - 30}{6 \times 8,03} = 1,24$$

Ou seja, o processo é potencialmente capaz.

Como pode-se verificar na Figura 3.26, o índice  $C_p$  é igual em ambos processos, ou seja, ele não avalia a capacidade real do processo, pois não verifica se o processo está centrado ou não.

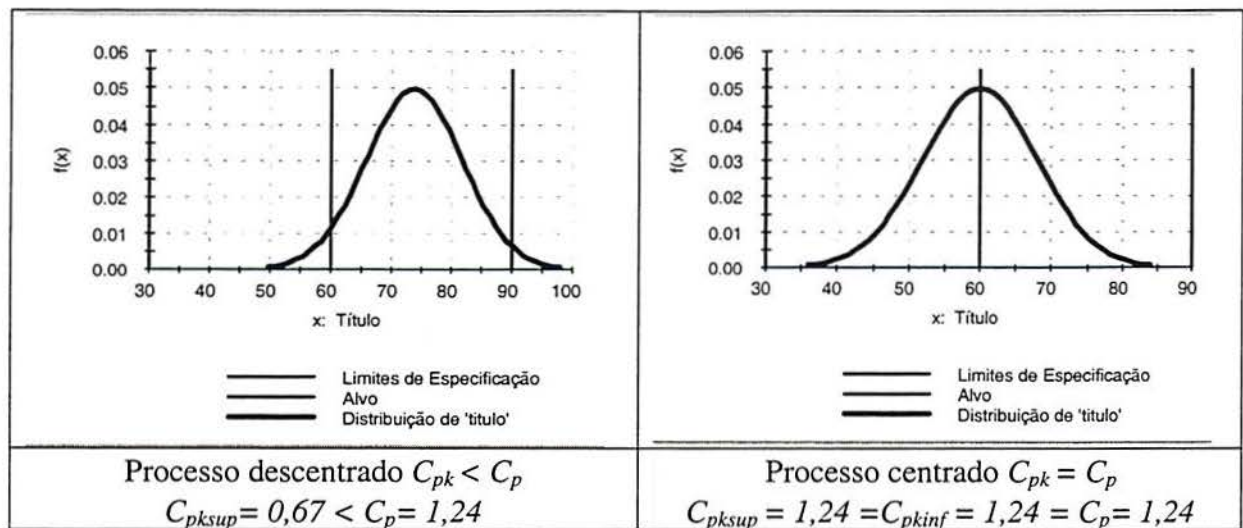


Figura 3.26 Processo descentrado versus processo centrado.

A capacidade real do processo para características do tipo nominal-é-melhor é estimada pelo índice  $C_{pk}$ :

$$eq. 3.31 \quad C_{pk} = \min\left\{\frac{LES - \bar{\bar{x}}}{3\hat{\sigma}}, \frac{\bar{\bar{x}} - LEI}{3\hat{\sigma}}\right\}$$

O cálculo do índice  $C_{pk}$  para o exemplo anterior seria:

$$eq. 3.32 \quad C_{pk} = \min\left\{\frac{90 - 73,8}{3 \times 8,03}, \frac{73,8 - 30}{3 \times 8,03}\right\} = 0,672$$

Caso o processo fosse centrado, ou seja, a média trazida para  $\bar{\bar{x}} = 60$ , o  $C_{pk}$  resultaria:

$$eq. 3.33 \quad C_{pk} = \min\left\{\frac{90 - 60}{3 \times 8,03}, \frac{60 - 30}{3 \times 8,03}\right\} = 1,245$$

Pode-se fazer algumas observações a respeito dos índices  $C_p$  e  $C_{pk}$ :

- o índice  $C_{pk}$  é menor do que o índice  $C_p$  quando o processo está descentrado e é igual ao  $C_p$  quando o processo está centrado;
- o índice  $C_{pk}$ , que mede a capacidade real do processo, é sempre menor ou igual ao índice  $C_p$  que mede a máxima capacidade do processo quando ele está centrado;
- o índice  $C_{pk} > 1$  é condição necessária para que a fração de defeituosos seja pequena ( $< 0,27\%$ ). Muitas empresas utilizam como padrão de qualidade a meta  $C_{pk} > 1,33$  que está associado a uma fração de defeituosos de  $0,00633\%$ .

Como pode ser visto na Figura 3.26, no caso de um processo que possui um  $C_{pk} < 1$  e um  $C_p > 1$ , basta centrar-se o processo que ele se torna capaz. Esse é um processo que, com



pouco investimento consegue-se torná-lo capaz, pois centrar o processo geralmente é uma tarefa fácil. Dessa forma, processos com  $C_{pk} < 1$  e  $C_p > 1$  devem ser priorizados nas ações de melhoria.

Caso a características de qualidade for do tipo maior-é-melhor, o valor do limite de especificação superior é teoricamente infinito, logo a avaliação da capacidade do processo será realizada apenas com o  $C_{pk}$  inferior.

Caso a característica for do tipo menor-é-melhor, o valor do limite de especificação inferior é teoricamente zero, logo a avaliação da capacidade do processo será realizada apenas com o  $C_{pk}$  superior.

O valor de  $C_{pk}$  pode auxiliar na decisão sobre onde concentrar os esforços de engenharia sendo que processos com menor  $C_{pk}$  devem ser priorizados nas ações de melhoria.

### **Cálculo do percentual fora de especificação**

É interessante estimar o percentual de peças produzidas dentro das especificações e o percentual de refugo e retrabalho, pois dessa forma tem-se uma estimativa dos custos associados à má qualidade.

O cálculo do percentual de peças fora de especificação é estimado calculando-se a média e a variabilidade da distribuição e o valor da variável reduzida  $Z$  para os limites de especificação.

Como podemos ver na Figura 3.27, o cálculo da variável reduzida  $Z$  faz uma transformação dos valores reais em valores codificados. Essa transformação é feita descontando-se a média para eliminar o efeito de localização e dividindo-se pelo desvio-padrão para eliminar o efeito de escala, como pode-se ver na eq. 3.34:

$$\text{eq. 3.34} \quad Z = \frac{LE - \mu}{\sigma}$$

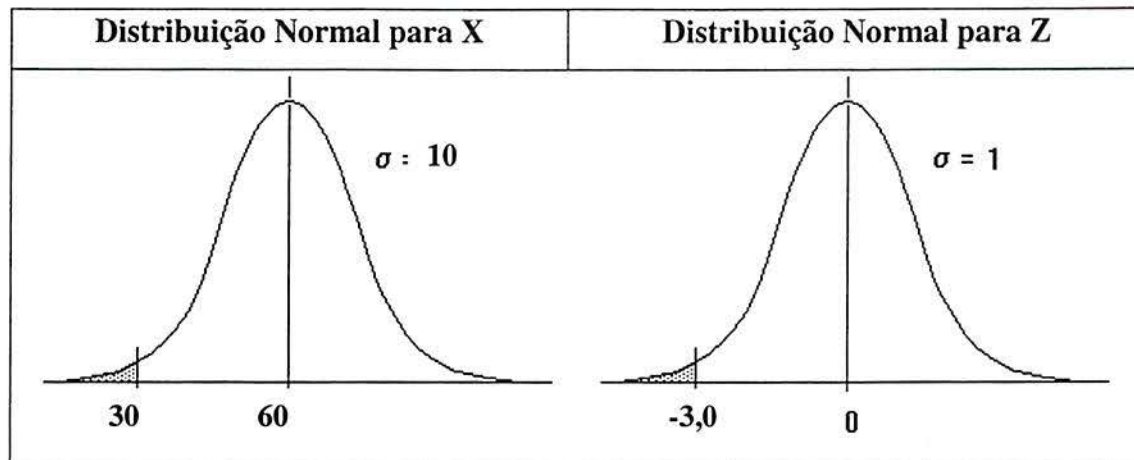


Figura 3.27 Distribuição de probabilidade dos valores reais e codificados.

Uma vez calculada a variável reduzida  $Z$ , consulta-se a tabela Normal padronizada para identificar a probabilidade acumulada à esquerda de  $Z$ , ou seja, a probabilidade de ocorrerem valores menores ou iguais a um certo valor de  $Z$  consultado. A seguir serão apresentados dois exemplos do cálculo do percentual fora de especificação.

### Exemplo 1

O percentual dentro das especificações do exemplo da fresa da Tabela 3.3, com média de 73,8, desvio-padrão de 8,03 e especificações de  $60 \pm 30$ , é calculado conforme segue.

O percentual abaixo da especificação inferior é calculado da seguinte forma:

$$\text{eq. 3.35} \quad P(X < 30) = P\left(Z < \frac{30 - 73,8}{8,03}\right) = P(Z < -5,45)$$

Uma vez calculado o valor de  $Z$ , consulta-se a tabela Normal padronizada:

$$\text{eq. 3.36} \quad P(Z < -5,45) = 0,0000$$

Ou seja, a probabilidade de peças produzidas abaixo do limite inferior de especificação é virtualmente zero.

Uma vez que a tabela Normal padronizada fornece a probabilidade acumulada à esquerda de  $Z$ , o percentual acima da especificação superior é calculado pelo complementar, ou seja:

$$\text{eq. 3.37} \quad P(X > 90) = 1 - P(X < 90) = 1 - P\left(Z < \frac{90 - 73,8}{8,03}\right) = 1 - P(Z < 2,017)$$

Uma vez calculado o valor de  $Z$ , consulta-se a tabela Normal padronizada:

$$\text{eq. 3.38} \quad P(Z < 2,017) = 0,9782$$

$$\text{eq. 3.39} \quad P(X > 90) = 1 - P(X < 90) = 1 - P(Z < 2,017) = 1 - 0,9782 = 0,0218$$

Ou seja, a probabilidade de peças produzidas acima do limite superior de especificação é de 2,18%.

O percentual dentro das especificações pode ser calculado descontando o percentual acima e abaixo das especificações como a seguir:

$$\text{eq. 3.40} \quad P(30 < X < 90) = 1 - 0,0000 - 0,0218 = 0,9782 \text{ ou } 97,82\%$$

Ou seja, a probabilidade de peças produzidas dentro dos limites de especificação é de 97,82%.

Na Figura 3.28, representa-se graficamente a distribuição dos valores da fresa e os limites de especificação do cliente. Como pode-se ver, o processo está descentrado para a direita, fazendo com que virtualmente nenhuma peça seja produzida abaixo do limite inferior mas, em compensação, sejam produzidas 2,17% peças acima do limite superior.

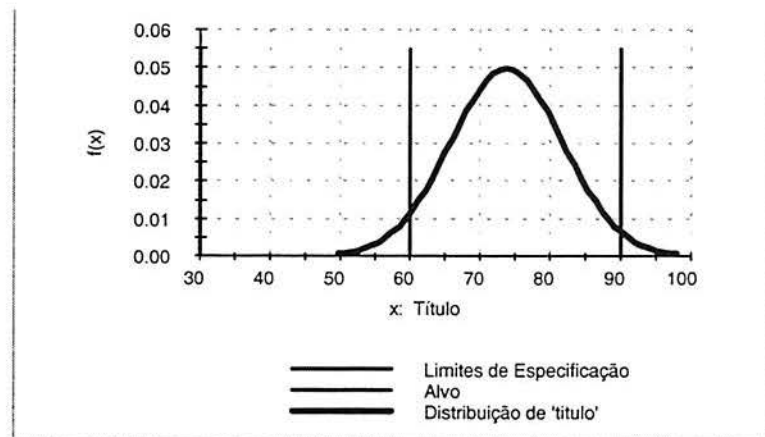


Figura 3.28 Distribuição de probabilidade do exemplo da fresa.

## Exemplo 2

O percentual dentro das especificações, supondo que o processo fosse centrado, ou seja, a média fosse alterada para 60 e o desvio-padrão mantido em 10, é calculado conforme segue.

O percentual abaixo da especificação inferior é calculado da seguinte forma:



$$\text{eq. 3.41} \quad P(X < 30) = P(Z < \frac{30 - 60}{10}) = P(Z < -3,00) = 0,00135$$

Ou seja, a probabilidade de peças produzidas abaixo do limite inferior de especificação é de 0,135%.

O percentual acima da especificação superior é calculado da seguinte forma:

$$\text{eq. 3.42} \quad P(X > 90) = 1 - P(X < 90) = 1 - P(Z < \frac{90 - 60}{10}) = 1 - P(Z < 3,00)$$

$$\text{eq. 3.43} \quad P(X > 90) = 1 - P(Z < 3,00) = 1 - 0,99865 = 0,00135$$

Ou seja, a probabilidade de peças produzidas acima do limite superior de especificação é de 0,135%.

O percentual dentro das especificações é calculado da seguinte forma:

$$\text{eq. 3.44} \quad P(30 < X < 90) = 1 - 0,00135 - 0,00135 \cong 0,9973 \text{ ou } 99,73\%$$

Ou seja, a probabilidade de peças produzidas dentro dos limites de especificação é de 99,73%.

Na Figura 3.29, representa-se graficamente a distribuição dos valores da fresa com o processo centrado e os mesmos limites de especificação do cliente. Como pode-se ver, o processo está centrado no valor nominal da especificação, reduzindo para 0,27% o percentual de peças fora de especificação.

Nas características de qualidade do tipo nominal-é-melhor, geralmente o ajuste para centrar o processo é relativamente fácil, logo esse procedimento se justifica economicamente.

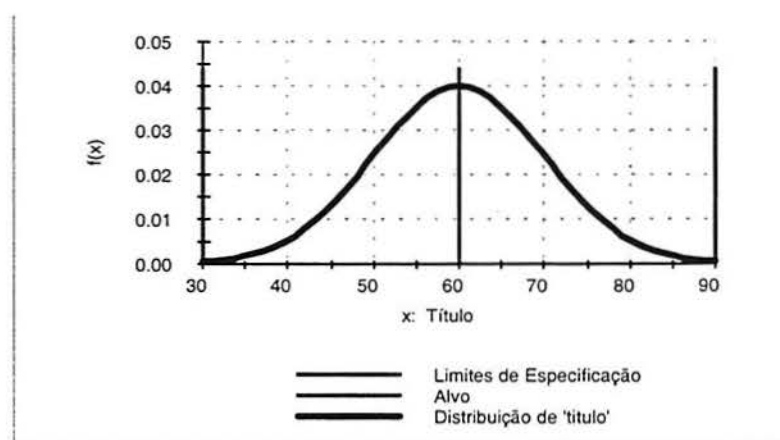


Figura 3.29 Distribuição de probabilidade do exemplo da fresa com o processo centrado.

## Distribuições não-normais

O cálculo dos índices de capacidade e do percentual de peças fora de especificação apresentado anteriormente foi realizado supondo que as variáveis provêm de uma distribuição Normal. Por isso, antes de realizar um estudo de capacidade é necessário verificar o tipo de distribuição que os dados seguem, utilizando-se, por exemplo, o histograma e o papel de probabilidade. Caso os dados não sigam a distribuição Normal, uma alternativa é utilizar uma transformação nos dados. O desejado é que os dados transformados sigam a distribuição Normal. Outra alternativa é calcular o percentual de peças fora de especificação usando os percentis da distribuição original dos valores individuais. Uma vez calculado o percentual de peças fora de especificação, deve-se identificar um valor de  $C_p$  que possua um percentual equivalente de peças fora de especificação. Dessa forma, pode-se ter o mesmo índice para avaliar a capacidade de todos os processos, o que permite compará-los e priorizar os esforços de melhoria naqueles que possuírem o menor índice  $C_{pk}$ .

A Tabela 3.8 apresenta diversos valores de  $C_{pk}$  e a respectiva quantidade de peças fora de especificação em partes por milhão (ppm). A segunda coluna refere-se à quantidade de peças fora de especificação, considerando um lado da distribuição, ou seja, quando as variáveis são do tipo menor-é-melhor ou maior-é-melhor. A terceira coluna refere-se à quantidade observada em ambos lados da distribuição, ou seja, quando a variável é do tipo nominal-é-melhor.

Tabela 3.8 Valores de  $C_{pk}$  e a respectiva quantidade de peças fora de especificação (ppm).

$C_{pk}$	Unilateral	Bilateral
0,25	226.628	453.255
0,50	66.807	133.614
0,60	35.391	71.861
0,70	17.865	35.729
0,80	8.198	16.395
0,90	3.467	6.934
1,00	1.350	2.700
1,10	484	967
1,20	159	318
1,30	48	96
1,40	14	27
1,50	4	7
1,60	1	2
1,70	0,17	0,34
1,80	0,03	0,06
2,00	0,0009	0,0018

### 3.2.2.5 Rotina e melhoria no controle do processo

Como pode-se visualizar na Figura 3.30, o controle estatístico de processo promove melhorias a partir de um procedimento iterativo.

Para melhorar a capacidade do processo após torná-lo estável (sem causas especiais), é preciso ação sobre o sistema (causas comuns). Isso em geral exige ação gerencial como:

a) treinamento de pessoal, b) revisão de procedimentos, c) revisão do ajuste de parâmetros, d) melhora da matéria-prima e manutenção / aquisição de equipamentos.



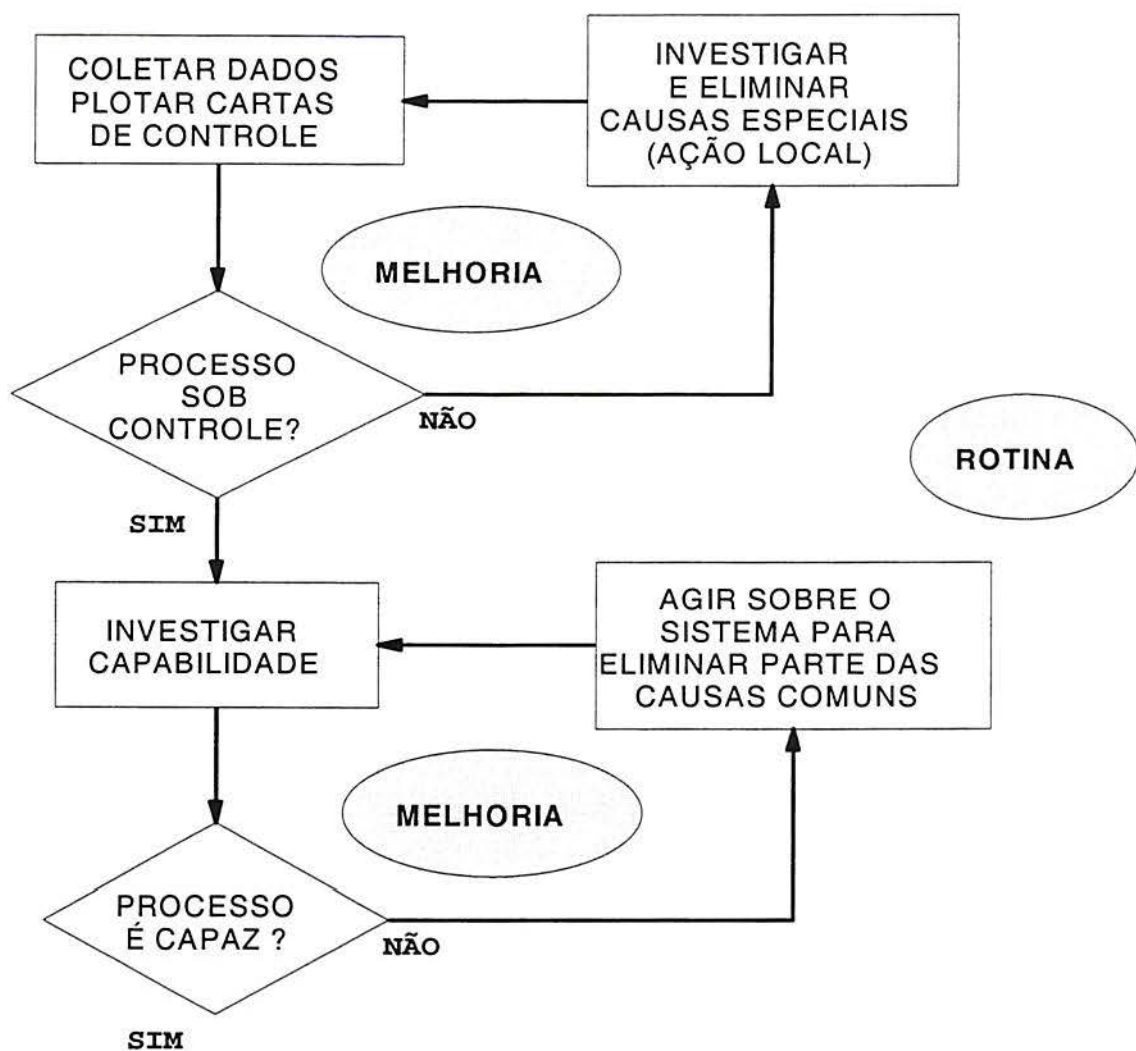


Figura 3.30 Processo iterativo de melhoria do processo.

### 3.2.3 Carta de controle para o desvio-padrão

Conforme o caso, o monitoramento do desvio-padrão ( $s$ ) pode ser mais apropriado que o monitoramento da amplitude. O desvio-padrão é um indicador mais eficiente da variabilidade, principalmente para amostras grandes. Tipicamente, recomenda-se o uso da carta  $s$  quando: a) os dados forem coletados por computador e for fácil de implementar uma rotina de cálculo, b) os processos forem sofisticados, controlados por especialistas e c) as amostras forem grandes (subgrupos de tamanho  $n > 10$ ).

Se os dados são volumosos, os valores individuais serão registrados em uma folha separada, e na folha da carta de controle irá aparecer apenas o valor calculado de  $\bar{x}$  e  $s$  para cada subgrupo.

A fórmula para o cálculo do desvio-padrão é:

$$eq. 3.45 \quad s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 - n\bar{x}^2}{n-1}}$$

E os limites de controle da média são calculados usando:

$$eq. 3.46 \quad LCS = \bar{\bar{x}} + A_3 \bar{s}$$

$$eq. 3.47 \quad LCI = \bar{\bar{x}} - A_3 \bar{s}$$

onde  $A_3$  é uma constante que depende do tamanho da amostra, cujos valores são apresentados na Tabela 3.9.

E os limites de controle do desvio-padrão são calculados usando:

$$eq. 3.48 \quad LCS = B_4 \bar{s}$$

$$eq. 3.49 \quad LCI = B_3 \bar{s}$$

onde  $B_4$  e  $B_3$  são constantes que dependem do tamanho da amostra, cujos valores são apresentados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 Valores das constantes  $B_4$ ,  $B_3$  e  $A_3$ .

$n$	2	3	4	5	6	8	9	10	15	20	25
$B_4$	3,27	2,57	2,27	2,09	1,97	1,82	1,716	1,72	1,57	1,49	1,43
$B_3$	0	0	0	0	0,03	0,19	0,239	0,28	0,43	0,51	0,57
$A_3$	2,66	1,95	1,63	1,43	1,29	1,10	1,032	0,98	0,79	0,68	0,61

### Exemplo de carta de controle para média ( $\bar{x}$ ) e desvio-padrão ( $s$ )

Na Tabela 3.10, apresentam-se os mesmos dados do exemplo da fresa, só que desta vez calcula-se a média e o desvio-padrão para cada amostra coletada.

Tabela 3.10 Dados do exemplo da fresa.

Nome da parte	Tanque de óleo					Especificações	10 a 20 microns									
Número da parte	0012-5					Instrumento	Micrômetro									
Operação	Pintura externa					Amostra/Freq.	5 / lote									
Máquina	025					Unidade	microns									
Característica	Recobrimento					Carta No.	02									
Data	6/3					7/3					8/3					
Hora	8	10	12	14	16	8	10	12	14	16	8	10	12	14	16	
Operador	A	A	A	B	B	A	A	A	B	B	A	A	A	B	B	
	1	65	75	80	65	80	75	80	70	85	65	75	85	70	70	75
	2	70	70	70	65	60	70	75	65	85	65	60	65	75	65	80
Medidas	3	75	80	70	65	80	60	65	75	75	65	75	75	75	85	85
	4	60	90	80	80	80	85	75	65	65	80	85	75	70	60	80
	5	80	70	80	65	75	75	70	85	80	60	90	80	70	75	90
Soma		350	385	380	340	375	365	365	360	390	335	385	380	360	355	410
Média		70	77	76	68	75	73	73	72	78	67	77	76	72	71	82
Des. padrão		7,9	8,4	5,5	6,7	8,7	9,1	5,7	8,4	8,4	7,6	11,5	7,4	2,7	9,6	5,7

Para o exemplo da Tabela 3.10, obteve-se  $\bar{\bar{x}} = 73,8$ ;  $\bar{s} = 7,55$ . Assim, os limites de controle foram calculados como segue.

Médias:

$$eq. 3.50 \quad LCS = \bar{\bar{x}} + \tilde{A}_2 \bar{R} = 73,8 + 1,43 \times 7,55 = 86,55$$

$$eq. 3.51 \quad LCI = \bar{\bar{x}} - \tilde{A}_2 \bar{R} = 73,8 - 1,43 \times 7,55 = 60,79$$

Desvio-padrão:

$$eq. 3.52 \quad LCS = B_4 \bar{S} = 2,09 \times 7,55 = 15,77$$

$$eq. 3.53 \quad LCI = B_3 \bar{S} = 0,00 \times 7,55 = 0,00$$

Como pode ser visto nas Figura 3.31 e Figura 3.32, o processo é estável ao longo do tempo.



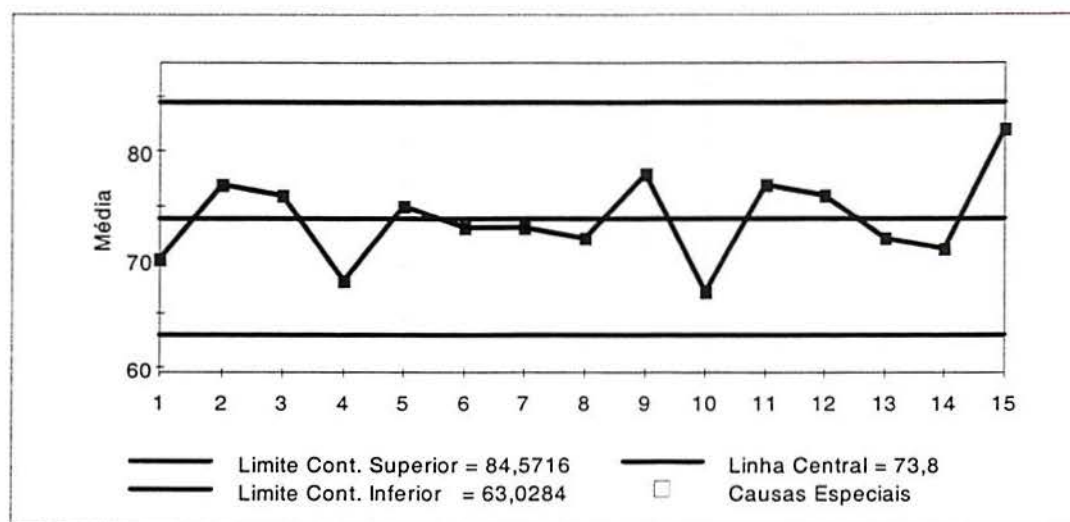


Figura 3.31 Exemplo de carta de controle para a média.

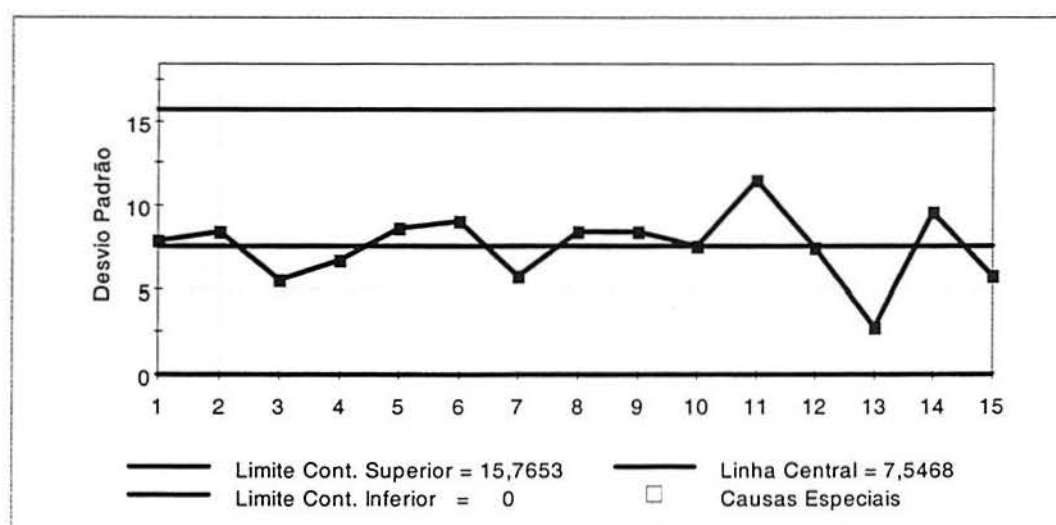


Figura 3.32 Exemplo de carta de controle para o desvio-padrão.

### 3.2.4 Carta de controle para a mediana ( $\tilde{x}$ ) e amplitude ( $R$ )

Muitas vezes monitorar a mediana ( $\tilde{x}$ ) em vez da média pode trazer algumas vantagens, pois: a) a mediana é mais fácil de calcular que a média e b) a mediana é robusta à presença de dados atípicos.

Como pode ser visto no exemplo abaixo, se houver um dado atípico, ele não influencia a mediana, mas influencia a média:

$$A \quad 10 \ 12 \ 14 \ 16 \ 18 \quad \bar{x} = 14; \tilde{x} = 14$$

$$B \quad 10 \ 12 \ 14 \ 16 \ 18 \quad \bar{x} = 18; \tilde{x} = 14$$

Enquanto a média foi influenciada pelo dado atípico 38, a mediana não foi, pois leva em conta apenas o ponto central.

A mediana é o valor central de uma amostra, ou seja, aquele valor que divide a amostra em 50% para esquerda e outros 50% para a direita. O procedimento para identificação da mediana é colocar os dados em ordem crescente e identificar o valor central.

Em função disso, muitas vezes o monitoramento da mediana é feito plotando em uma carta de controle todos os valores individuais, pois dessa forma eles ficam automaticamente em ordem crescente, e assinalando o valor mediano.

Para esse procedimento ser prático, o subgrupo deve ser pequeno e com tamanho ímpar (3, 5 ou 7).

Os limites de controle são calculados usando-se o valor médio das medianas ( $\bar{\tilde{x}}$ ) e o formulário conforme segue.

Medianas:

$$\text{eq. 3.54} \quad LCS = \bar{\tilde{x}} + \tilde{A}_2 \bar{R}$$

$$\text{eq. 3.55} \quad LCI = \bar{\tilde{x}} - \tilde{A}_2 \bar{R}$$

onde  $\tilde{A}_2$  é uma constante que depende do tamanho de amostra, cujos valores são apresentados na Tabela 3.11.

Amplitudes:

$$\text{eq. 3.56} \quad LCS = D_4 \bar{R}$$

$$\text{eq. 3.57} \quad LCI = D_3 \bar{R}$$

onde  $D_4$  e  $D_3$  são constantes que dependem do tamanho da amostra, cujos valores são apresentados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 Valores da constante  $\tilde{A}_2$ .

$n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\tilde{A}_2$	1,88	1,19	0,80	0,69	0,55	0,51	0,43	0,41	0,36

O monitoramento segue a mesma ótica vista para as médias: qualquer valor de amplitude ou mediana fora dos limites de controle indica que o operador deve agir para corrigir o processo ou notificar o supervisor e pessoal de suporte.

### Exemplo de carta de controle para a mediana ( $\tilde{x}$ ) e amplitude ( $R$ )

Na Tabela 3.12, apresentam-se os mesmos dados do exemplo da fresa, só que dessa vez calcula-se a mediana e a amplitude para cada amostra coletada.

Tabela 3.12 Dados do exemplo da fresa.

Nome da parte	Tanque de óleo					Especificações	10 a 20 microns									
Número da parte	0012-5					Instrumento	Micrômetro									
Operação	Pintura externa					Amostra/Freq.	5 / lote									
Máquina	025					Unidade	microns									
Característica	Recobrimento					Carta No.	03									
Data	6/3					7/3					8/3					
Hora	8	10	12	14	16	8	10	12	14	16	8	10	12	14	16	
Operador	A	A	A	B	B	A	A	A	B	B	A	A	A	B	B	
1	65	75	80	65	80	75	80	70	85	65	75	85	70	70	75	
2	70	70	70	65	60	70	75	65	85	65	60	65	75	65	80	
Medidas 3	75	80	70	65	80	60	65	75	75	65	75	75	75	85	85	
4	60	90	80	80	80	85	75	65	65	80	85	75	70	60	80	
5	80	70	80	65	75	75	70	85	80	60	90	80	70	75	90	
Soma	350	385	380	340	375	365	365	360	390	335	385	380	360	355	410	
Mediana	70	75	80	65	80	75	75	70	80	65	75	75	70	70	80	
Amplitude	20	20	10	15	20	25	15	20	20	20	30	20	5	25	15	

Para o exemplo da Tabela 3.12, obteve-se  $\bar{\tilde{x}} = 73,6$ ,  $\bar{R} = 18,7$ . Assim os limites de controle foram calculados como segue.

Medianas:

$$eq. 3.58 \quad LCS = \bar{\tilde{x}} + \tilde{A}_2 \bar{R} = 73,6 + 0,69 \times 18,7 = 86,55$$

$$eq. 3.59 \quad LCI = \bar{\tilde{x}} - \tilde{A}_2 \bar{R} = 73,6 - 0,69 \times 18,7 = 60,79$$

Amplitudes:

$$eq. 3.60 \quad LCS = D_4 \bar{R} = 2,11 \times 18,7 = 39,47$$

$$eq. 3.61 \quad LCI = D_3 \bar{R} = 0,00 \times 18,7 = 0,00$$



Como pode ser visto nas Figura 3.33 e Figura 3.34, o processo é estável ao longo do tempo.

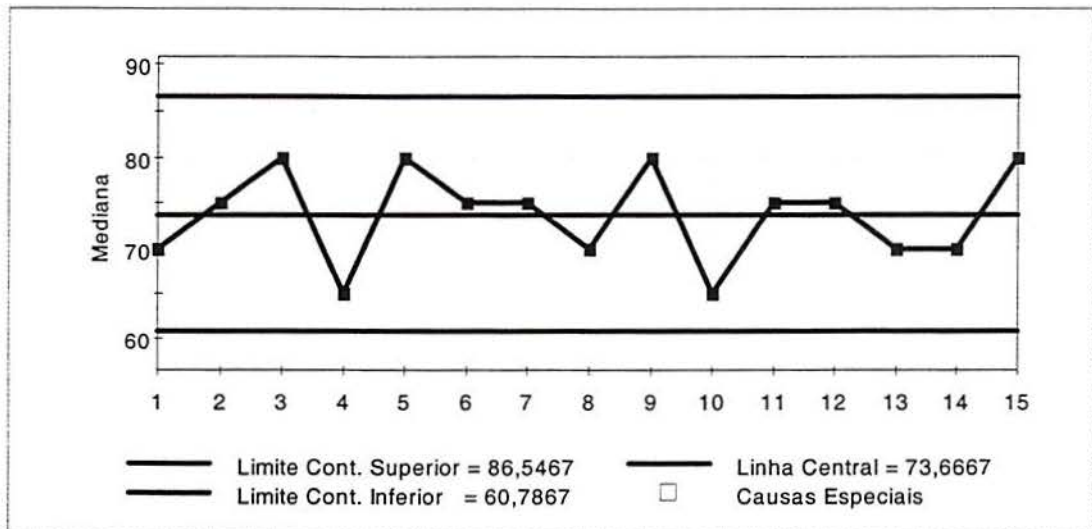


Figura 3.33 Exemplo de carta de controle para a mediana.

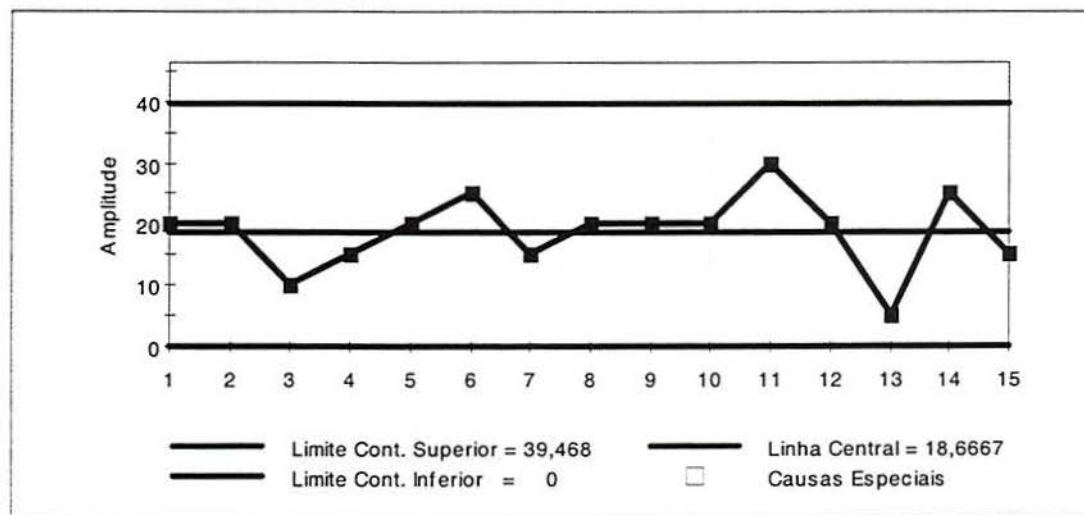


Figura 3.34 Exemplo de carta de controle para a amplitude.

### 3.2.5 Carta de controle para valores individuais

Algumas vezes é preciso realizar o controle do processo usando medidas individuais. Esse será o caso quando: a) taxa de produção muito baixa (por ex: 1 produto por dia), b) testes muito caros (por ex: testes destrutivos ou que exijam a parada da produção) e c) características muito homogêneas, que variam muito lentamente (por ex: um digestor químico).

As cartas dos valores individuais não se beneficiam do teorema do limite central que garante que as médias seguem à distribuição Normal, logo deve-se ter alguns cuidados com a sua aplicação: a) se a distribuição não for simétrica, a interpretação das cartas deve levar isso em conta, b) as cartas de valores individuais não são tão sensíveis a mudanças no processo como as cartas de médias, c) os pontos da carta da amplitude móvel são correlacionados, e essa correlação pode induzir um padrão ou ciclos na carta de amplitude e d) as cartas de valores individuais não permitem avaliar diretamente a dispersão do processo. Para contornar esse último aspecto, em geral se usa uma amplitude móvel calculada como a diferença entre cada par de leituras sucessivas. Dessa forma, o tamanho de amostra é considerado  $n=2$ .

Os limites de controle para a carta de valores individuais são calculados como segue.

Amplitude:

$$\text{eq. 3.62} \quad LCS = D_4 \bar{R}$$

$$\text{eq. 3.63} \quad LCI = D_3 \bar{R}$$

onde  $D_4$  e  $D_3$  são constantes que dependem do tamanho da amostra, cujos valores são apresentados na 0.

Valores individuais:

$$\text{eq. 3.64} \quad LCS = \bar{x} + E_2 \bar{R}$$

$$\text{eq. 3.65} \quad LCI = \bar{x} - E_2 \bar{R}$$

onde  $E_2$  é uma constante que depende do tamanho da amostra, cujos valores são apresentados na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 Valores da constante  $E_2$ .

$n$	2	3	4	5	6
$E_2$	2,66	1,77	1,46	1,29	1,18

A constante  $E_2$  só poderá ser usada se a distribuição for aproximadamente simétrica. A variabilidade do processo continua sendo estimada usando-se  $\hat{\sigma} = \bar{R} / d_2$ .

### Exemplo de carta de controle para valores individuais

Os dados da Tabela 3.14 representam medidas diárias de viscosidade de bateladas químicas durante um período de 30 dias.

Tabela 3.14 Valores de viscosidade de bateladas químicas.

Amostra	Dia	Valor	A. móvel	M. móvel	Amplitude
1	10/Jun	6	-	-	-
2	11/Jun	6,5	0,5	-	-
3	12/Jun	6	0,5	-	-
4	13/Jun	5	1	5,875	1,5
5	14/Jun	6,2	1,2	5,925	1,5
6	15/Jun	4,5	1,7	5,425	1,7
7	16/Jun	6	1,5	5,425	1,7
8	17/Jun	5,4	0,6	5,525	1,7
9	18/Jun	5	0,4	5,225	1,5
10	19/Jun	6,5	1,5	5,725	1,5
11	20/Jun	6,1	0,4	5,75	1,5
12	21/Jun	5,6	0,5	5,8	1,5
13	22/Jun	5,5	0,1	5,925	1
14	23/Jun	4,5	1	5,425	1,6
15	24/Jun	4,2	0,3	4,95	1,4
16	25/Jun	4,7	0,5	4,725	1,3
17	26/Jun	7,8	3,1	5,3	3,6
18	27/Jun	4,5	3,3	5,3	3,6
19	28/Jun	6	1,5	5,75	3,3
20	29/Jun	7	1	6,325	3,3
21	30/Jun	6	1	5,875	2,5
22	01/Jul	6	0	6,25	1
23	02/Jul	5,5	0,5	6,125	1,5
24	03/Jul	6,5	1	6	1
25	04/Jul	6	0,5	6	1
26	05/Jul	6,5	0,5	6,125	1
27	06/Jul	5	1,5	6	1,5
28	07/Jul	6,5	1,5	6	1,5
29	08/Jul	6	0,5	6	1,5
30	09/Jul	6,5	0,5	6	1,5
	<b>Média</b>	<b>5,78</b>	<b>0,97</b>	<b>5,73</b>	<b>1,75</b>

Conhecendo-se:  $\bar{x} = 5,78$ ;  $\bar{R} = 0,97$ , os limites de controle são calculados como segue.

Valores individuais:

$$\text{eq. 3.66} \quad LCS = \bar{x} + E_2 \bar{R} = 5,78 + 2,66 \times 0,97 = 8,36$$

$$\text{eq. 3.67} \quad LCI = \bar{x} - E_2 \bar{R} = 5,78 - 2,66 \times 0,97 = 3,21$$



Amplitudes:

$$\text{eq. 3.68} \quad LCS = D_4 \bar{R} = 3,27 \times 0,97 = 3,17$$

$$\text{eq. 3.69} \quad LCI = D_3 \bar{R} = 0,00 \times 0,97 = 0,00$$

Na Figura 3.35, apresenta-se a carta de valores individuais com os limites de controle calculado sem causas especiais e na Figura 3.36, apresenta-se uma carta de amplitude móvel. Como pode ser observado, na carta de amplitude os pontos são correlacionados, devido à forma com que se realiza o cálculo da amplitude entre amostras.

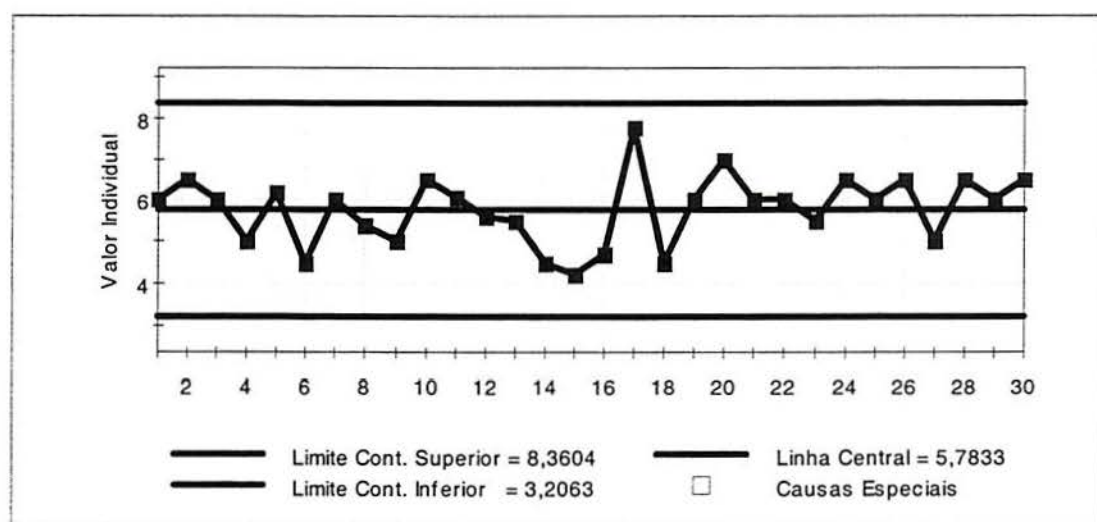


Figura 3.35 Carta de controle para valores individuais (retirando causas especiais).

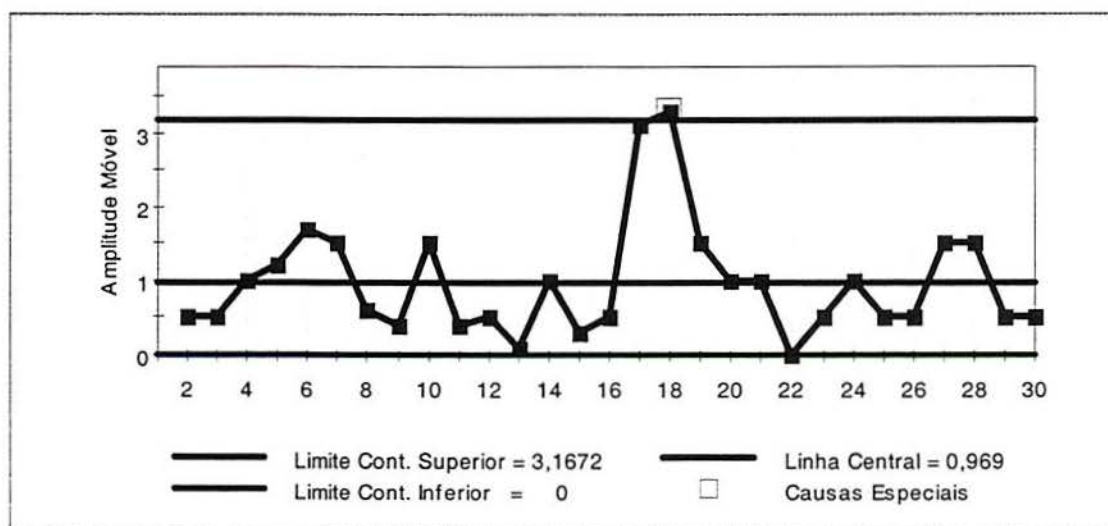


Figura 3.36 Carta de controle para amplitude móvel (retirando causas especiais).

### 3.2.6 Cartas de controle para médias móveis

As cartas de médias móveis são: a) muito efetivas para detectar pequenas mudanças na média e b) indicadas para o controle automatizado.

O uso simultâneo de cartas de médias móveis ( $M_t$ ) e médias simples ( $\bar{x}$ ) ou valores individuais ( $x$ ) é recomendado.

A média móvel de passo  $w$  é definida como:

$$\text{eq. 3.70} \quad M_t = \frac{\bar{x}_t + \bar{x}_{t-1} + \dots + \bar{x}_{t-w+1}}{w}$$

A média móvel é recalculada a cada nova amostra (subgrupo), incorporando a amostra mais recente e descartando a amostra mais antiga.

A variância da média móvel ( $\sigma_{M_t}$ ) resulta:

$$\text{eq. 3.71} \quad \sigma_{M_t} = \frac{\sigma}{\sqrt{nw}}$$

Assim, os limites de controle para a média móvel para períodos onde  $t \geq w$  serão:

$$\text{eq. 3.72} \quad LCS = \bar{\bar{x}} + \frac{3\sigma}{\sqrt{nw}}$$

$$\text{eq. 3.73} \quad LCI = \bar{\bar{x}} - \frac{3\sigma}{\sqrt{nw}}$$

ou

$$\text{eq. 3.74} \quad LCS = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}$$

$$\text{eq. 3.75} \quad LCI = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$$

Para o exemplo anterior da Tabela 3.14 tem-se  $w = 4$ ,  $\bar{\bar{x}} = 5,73$ ,  $\bar{R} = 1,75$  e os limites de controle resultaram:

$$\text{eq. 3.76} \quad LCS = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} = 5,73 + 0,73 \times 1,75 = 7,02$$

$$\text{eq. 3.77} \quad LCI = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} = 5,73 - 0,73 \times 1,75 = 4,44$$

Na Figura 3.37, apresenta-se a carta de médias móveis do exemplo anterior.

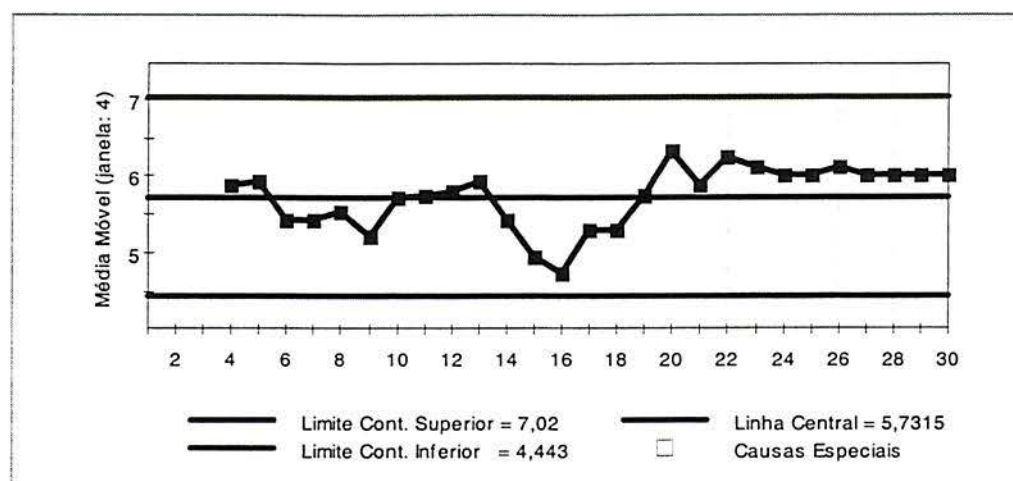


Figura 3.37 Carta de controle para média móvel (retirando causas especiais).

Para períodos onde  $0 < t < w$ , usa-se:

$$\text{eq. 3.78} \quad LCS = \bar{\bar{x}} + 3\sigma / \sqrt{nt}$$

$$\text{eq. 3.79} \quad LCI = \bar{\bar{x}} - 3\sigma / \sqrt{nt}$$

### Exemplo de carta de controle para médias móveis

Seja um processo com tamanho de amostra  $n=8$ ,  $\bar{\bar{x}} = 10,0$  e  $\sigma = 5,66$ . Supondo que se deseje construir um gráfico de médias móveis com passo  $w=8$  para esses dados.

Na Tabela 3.15, apresentam-se os primeiros dez valores de viscosidade.

Tabela 3.15 Valores de médias móveis para a viscosidade.

$t$	$\bar{X}_t$	$M_t$	$LSC$	$LIC$
1	10,5	10,5	16,00	4,00
2	6,0	8,25	14,24	5,76
3	10,0	8,83	13,46	6,54
4	11,0	9,38	13,00	7,00
5	12,5	10,00	12,68	7,32
6	9,5	9,92	12,45	7,55
7	6,0	9,36	12,27	7,73
8	10,0	9,44	12,12	7,88
9	10,5	9,44	12,12	7,88
10	14,5	10,50	12,12	7,88
11	.	.	.	.
12	.	.	.	.
13	.	.	.	.



A média móvel de amplitude  $w=8$  será:

$$\text{eq. 3.80} \quad M_t = \frac{\bar{x}_t + \bar{x}_{t-1} + \dots + \bar{x}_{t-w+1}}{8}$$

Por exemplo, para  $t=4$ , os limites de controle resultaram:

$$\text{eq. 3.81} \quad LSC = 10 + 3 \times 5,66 / \sqrt{8 \times 4} = 13,0$$

$$\text{eq. 3.82} \quad LIC = 10 - 3 \times 5,66 / \sqrt{8 \times 4} = 7,0$$

E para  $t=8$ , os limites de controle resultaram:

$$\text{eq. 3.83} \quad LSC = 10 + 3 \times 5,66 / \sqrt{8 \times 8} = 12,12$$

$$\text{eq. 3.84} \quad LIC = 10 - 3 \times 5,66 / \sqrt{8 \times 8} = 7,88$$

Na Figura 3.38, apresenta-se a carta de controle de médias móveis da viscosidade.

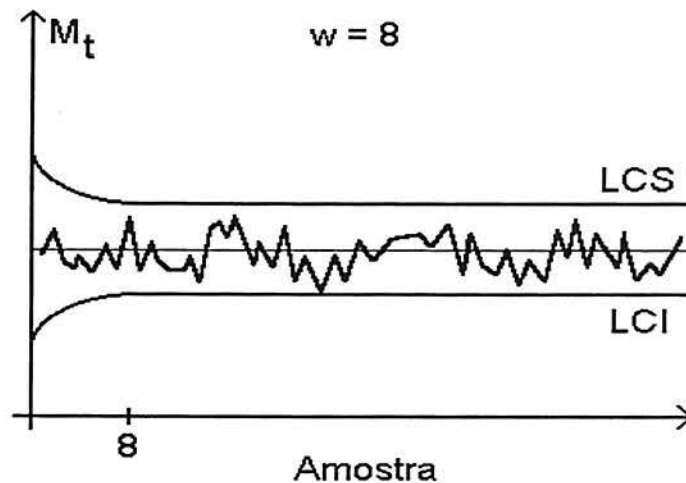


Figura 3.38 Exemplo da carta de controle para médias móveis.

### 3.2.7 Escolha do tipo de carta de controle

Na Figura 3.39, apresenta-se um fluxograma que auxilia na escolha do tipo de carta de controle a ser utilizada no monitoramento de variáveis.

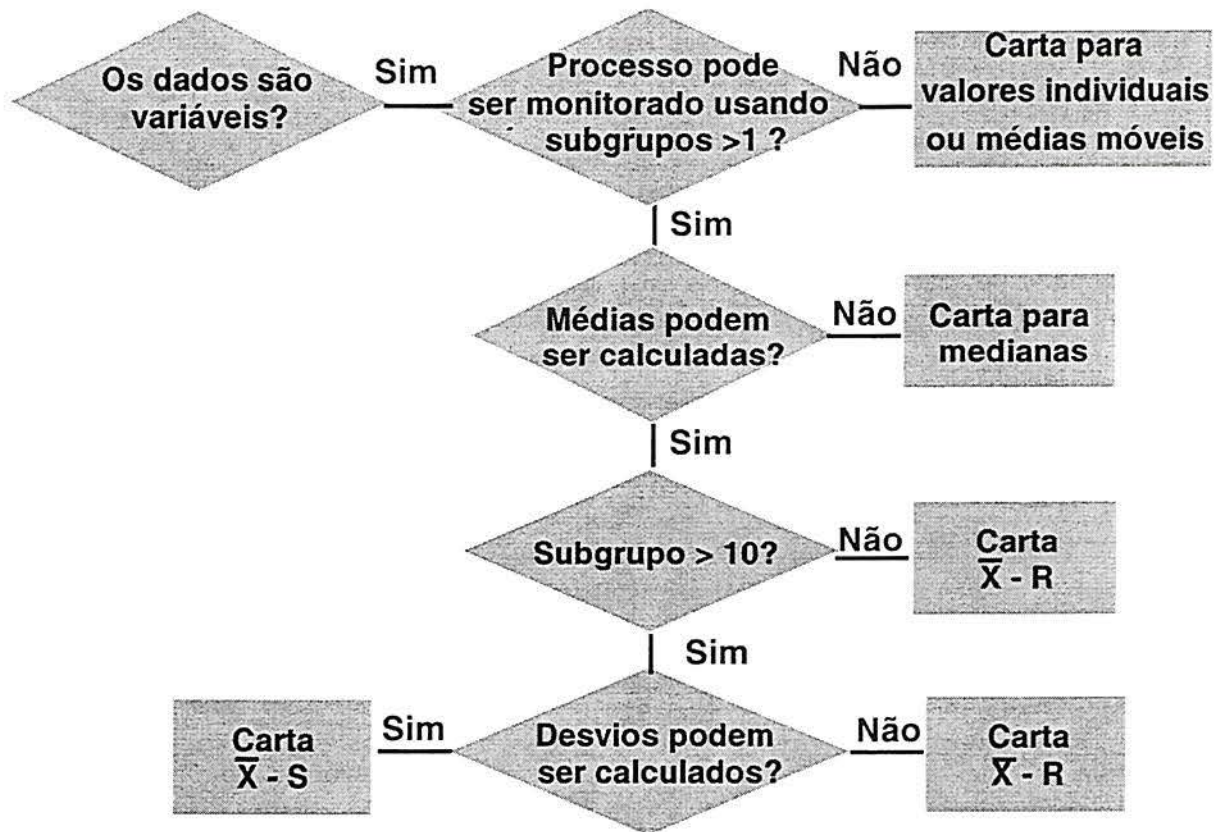


Figura 3.39 Fluxograma de apoio para escolha das cartas de controle.

### 3.3 Carta de controle para atributos

Os atributos são características que são comparadas com um certo padrão (especificações) e por isso podem assumir apenas valores discretos (classificação como conforme ou não conforme, ou uma certa contagem de defeitos), por exemplo: a) existência de manchas ou risco, b) presença de uma etiqueta, c) continuidade de um circuito elétrico.

Os atributos existem na maioria dos processos técnicos ou administrativos. Portanto, há muitas aplicações para esse tipo de carta de controle. A gerência costuma sumarizar resultados utilizando dados do tipo atributo, por isso, muitas vezes, os dados históricos existentes são do tipo atributo.

Além disso, em geral os atributos não requerem muita especialização para a coleta dos dados. O monitoramento usando atributos pode ser uma etapa intermediária, anterior a monitorização de variáveis.

Existem quatro tipos de carta de atributos:

- a) carta  $p$  para fração de não-conformes (as amostras podem ser de tamanhos diferentes);
- b) carta  $np$  para número de unidades não-conformes (as amostras devem ter o mesmo tamanho);
- c) carta  $c$  para número de não-conformidades (as amostras devem ser do mesmo tamanho);
- d) carta  $u$  para número de não-conformidades por unidade (as amostras podem ser de tamanhos diferentes).

### 3.3.1 Carta $p$ para fração de não-conformes

A carta  $p$  mede a fração de produtos defeituosos em um grupo. O grupo pode ser definido como 100 unidades coletadas duas vezes ao dia ou 80 unidades extraídas de cada lote de produção, etc.

#### 3.3.1.1 Coleta de dados

Cartas de atributo exigem subgrupos de tamanho considerável (em geral 50 a 200 unidades ou mais) para serem eficientes na detecção de alterações no processo.

Alguns estatísticos recomendam  $\bar{np} > 5$  para que seja possível uma análise eficiente de padrões. O tamanho dos grupos ( $n$ ) pode ser variável, mas é mais prático trabalhar com subgrupos de tamanho constante.

A frequência de amostragem deve fazer sentido em termos de períodos de produção. Por exemplo, 1 amostra a cada lote, ou 1 amostra por turno, ou uma amostra a cada troca de *setup*, etc.

#### 3.3.1.2 Cálculo dos limites de controle

Para cada subgrupo, anota-se os valores:

$n$  = número de itens inspecionados

$d$  = número de itens defeituosos (não-conformes)

E então calcula-se:

$$\text{eq. 3.85} \quad p = d/n = \text{fração de não-conformes}$$



A fração média de não-conformes é calculada da seguinte forma:

$$eq. 3.86 \quad \bar{p} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_k}{n_1 + n_2 + \dots + n_k}$$

$$eq. 3.87 \quad \sigma_p = \sqrt{\bar{p}(1 - \bar{p})} / \sqrt{n_i}$$

onde  $d_i$  é o número de não-conformes no subgrupo  $i$ ,  $n_i$  é o tamanho da amostra do subgrupo  $i$  e  $k$  é o número de subgrupos.

Esses cálculos devem ser feitos com um número grande de subgrupos, por exemplo,  $k > 25$ , e em uma situação de processo sob controle

Os limites de controle são calculados da seguinte forma:

$$eq. 3.88 \quad LCS = \bar{p} + 3\sigma_p$$

$$eq. 3.89 \quad LCI = \bar{p} - 3\sigma_p$$

Se o limite inferior resultar negativo, então ele deve ser fixado em zero.

Se o tamanho dos subgrupos for variável, o desvio-padrão é variável e por consequência, os limites de controle também, gerando uma carta com limites de controle de forma dentada.

Se a diferença nos tamanhos de amostras for pequena ( $< 25\%$ ), pode-se usar a média dos tamanhos de amostras. Dessa forma, o desvio-padrão será calculando usando-se:

$$eq. 3.90 \quad \sigma_p = \sqrt{\bar{p}(1 - \bar{p})} / \sqrt{\bar{n}}$$

### 3.3.1.3 Interpretação da estabilidade do processo

A presença de um ou mais pontos fora dos limites de controle é uma evidência de instabilidade do processo.

Se o processo está em controle estatístico, a probabilidade de um ponto fora dos limites de controle é muito pequena, de forma que, caso isso aconteça, deve-se assumir a presença de causas especiais.

Um ponto acima do limite de controle superior ( $LCS$ ) indica que o processo piorou. Um ponto abaixo do limite de controle inferior ( $LCI$ ) indica uma melhora no processo. Ambos devem ser investigados, pois são causas não naturais ao processo.

Vale ressaltar que antes de disparar a investigação, deve-se verificar se o ponto não foi mal plotado ou se não há um problema no sistema de medição.

### **Padrões e Corridas**

Mesmo com todos os pontos dentro dos limites de controle, podem haver evidências de que o processo sofreu alteração. As seguintes constatações indicam alterações no processo (válidas para  $n\bar{p} > 9$ ):

- a) sete pontos em sequência acima (ou abaixo) da linha central;
- b) sete pontos em sequência ascendente (ou descendente).

As corridas ascendentes ou corridas acima da média indicam que o desempenho do processo piorou. As corridas descendentes ou corridas abaixo da média indicam que o processo melhorou.

### **Deteção e correção de causas especiais**

Quando um resultado fora do controle é identificado, o processo deve ser estudado para determinar a causa. No caso de pontos acima do limite de controle superior, a causa deve ser corrigida e as ações devem ser tais que impeçam a sua recorrência. No caso de pontos abaixo do limite inferior, as causas devem ser padronizadas, pois representam uma melhora no processo.

Para o estudo das causas especiais, a análise de Pareto e diagramas de causa e efeito são recomendados.

### **Reavaliação dos limites de controle**

Se ações de melhoria estão sendo tomadas, o processo deve apresentar um desempenho mais consistente, com redução da fração média de não-conformes. Assim, periodicamente os limites de controle devem ser reavaliados e, sempre que houver evidência para tanto, estreitados. Esse enfoque dinâmico mantém as cartas de controle atualizadas e eficazes na tarefa de continuar revelando fontes de variabilidade.

#### **3.3.1.4 Interpretação da capacidade do processo.**

Após a identificação e eliminação das causas especiais, o processo pode ser avaliado em relação a sua capacidade.

No caso de atributos, a capacidade é em geral expressa como o percentual (%) de produtos conformes que o processo produz, ou seja,

$$\text{eq. 3.91} \quad \text{Capacidade} = (1 - \bar{p}) \times 100$$

Assim, se um processo tem  $\bar{p} = 0,031$ , sua capacidade será:

$$\text{eq. 3.92} \quad \text{Capacidade} = (1 - 0,031) \times 100 = 96,9\%$$

Essa capacidade deve ser comparada com as expectativas e metas gerenciais. Caso ela não seja satisfatória, a gerência deve agir sobre o sistema (causas comuns).

Alternativamente, o percentual de não-conformes pode ser comparado com as expectativas e metas gerenciais, gerando um índice de capacidade  $C_p$ , dado por:

$$\text{eq. 3.93} \quad C_p = \frac{P_{\text{meta}}}{\bar{p}}$$

Caso  $C_p < 1$ , a gerência deve agir sobre o sistema. A ação sobre as causas comuns é mais difícil e em geral irá envolver o estudo de variáveis, e o uso de técnicas estatísticas como projeto de experimentos ou análise multivariada.

### Exemplo da carta de controle para fração de não-conformes $p$

Os dados da Tabela 3.16 representam o número de eixos defeituosos de um certo modelo de motor. As medições foram feitas a partir de lotes de 80 unidades.

Tabela 3.16 Dados do exemplo da carta  $p$ .

Lote	$d_i$	$p_i$	Lote	$d_i$	$p_i$	Lote	$d_i$	$p_i$
1	9	0,112	11	18	0,225	21	25	0,313
2	11	0,138	12	13	0,163	22	16	0,200
3	5	0,063	13	23	0,287	23	10	0,125
4	8	0,100	14	9	0,113	24	13	0,163
5	17	0,213	15	11	0,137	25	8	0,100
6	10	0,125	16	6	0,075	26	14	0,175
7	15	0,188	17	14	0,175	27	10	0,125
8	11	0,137	18	12	0,150	28	7	0,088
9	6	0,075	19	21	0,263	29	13	0,163
10	7	0,087	20	19	0,238	30	16	0,200

Inicialmente, calcula-se  $\bar{p}$  e  $\sigma$ :



$$\text{eq. 3.94} \quad \bar{p} = \sum d_i / \sum n_i = 0,157$$

$$\text{eq. 3.95} \quad \sigma_p = \sqrt{\bar{p}(1-\bar{p}) / \sqrt{n_i}} = 0,0407$$

E logo após os limites de controle:

$$\text{eq. 3.96} \quad LCS = \bar{p} + 3\sigma_p = 0,157 + 3 \times 0,0407 = 0,279$$

$$\text{eq. 3.97} \quad LCI = \bar{p} - 3\sigma_p = 0,157 - 3 \times 0,0407 = 0,035$$

Como o processo apresentou duas causas especiais, deve-se recalculer os limites de controle eliminando as amostras 13 e 21. Conhecendo-se  $\bar{p} = 0,147$  e  $\sigma = 0,0396$ , os limites de controle para a fração de não-conformes resultam:

$$\text{eq. 3.98} \quad LCS = 0,147 + 3 \times 0,0396 = 0,266$$

$$\text{eq. 3.99} \quad LCI = 0,147 - 3 \times 0,0396 = 0,028$$

Na Figura 3.40, apresenta-se um exemplo de carta para fração de não-conformes.

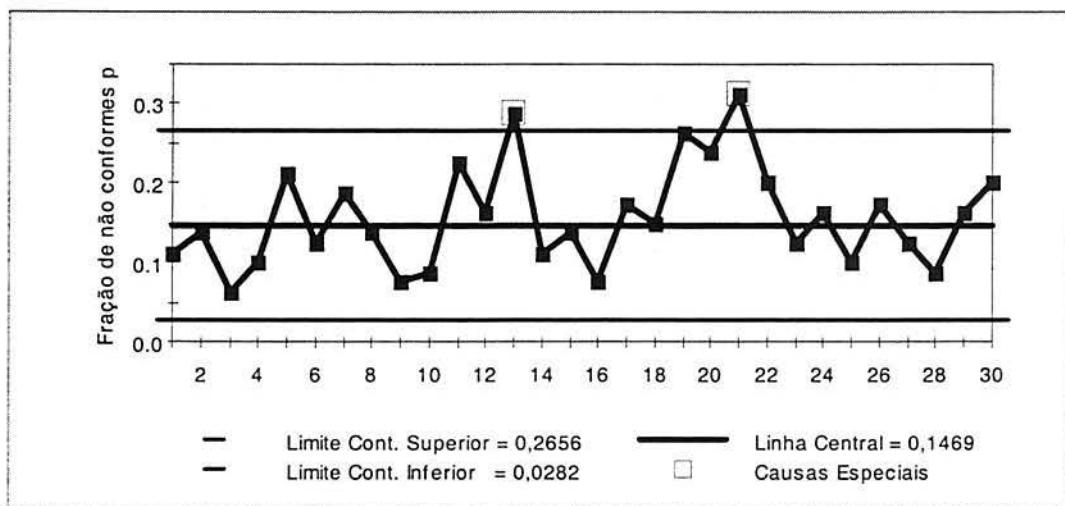


Figura 3.40 Carta  $p$  para o exemplo dos eixos defeituosos (retirando causas especiais).

### 3.3.2 Carta $np$ para número de não-conformes

A carta  $np$  segue a mesma lógica da carta  $p$ , mas agora, ao invés da fração de não-conformes, monitora-se o número de não-conformes.

A carta  $np$  é mais apropriada quando: a) o número de não-conformes tem um maior significado e b) o tamanho dos subgrupos é sempre o mesmo (constante).

### 3.3.2.1 Coleta de dados

Como o monitoramento é realizado utilizando-se número de defeituosos, deve-se especificar o tamanho da amostra constante, ou seja, número de unidades a serem inspecionadas a cada amostra. Então, anota-se o número de não-conformes verificado em cada amostra.

### 3.3.2.2 Cálculo dos limites de controle

Inicialmente calcula-se o número médio de não-conformes e o desvio-padrão:

$$\text{eq. 3.100} \quad n\bar{p} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_k}{k}$$

$$\text{eq. 3.101} \quad \sigma_{np} = \sqrt{n\bar{p}(1 - \bar{p})}$$

onde:  $d_i$  é o número de não-conformes no subgrupo  $i$ ;

$k$  é o número de subgrupos.

Os limites de controle para o número de não-conformes são calculados pelas seguintes equações:

$$\text{eq. 3.102} \quad LCS = n\bar{p} + 3\sigma_{np}$$

$$\text{eq. 3.103} \quad LCI = n\bar{p} - 3\sigma_{np}$$

### Exemplo da carta de controle para número de não-conformes $np$

Os dados da Tabela 3.17 representam o número peças defeituosas observadas em lotes de 200 unidades de um certo modelo de peça plástica injetada.

Tabela 3.17 Dados do exemplo da carta  $np$ .

Lote	$np$	Lote	$np$	Lote	$np$	Lote	$np$
1	7	6	12	11	8	16	6
2	13	7	6	12	7	17	10
3	15	8	11	13	12	18	16
4	9	9	6	14	5	19	14
5	7	10	8	15	15	20	6

Inicialmente, calcula-se  $n\bar{p}$  e  $\sigma$ :

$$eq. 3.104 \quad n\bar{p} = \sum np / k = 9,65$$

$$eq. 3.105 \quad \sigma_{np} = \sqrt{n\bar{p}(1 - \bar{p})} = 3,03$$

E logo após, os limites de controle para o número de não-conformes:

$$eq. 3.106 \quad LCS = n\bar{p} + 3\sigma_{np} = 9,65 + 3 \times 3,03 = 18,74$$

$$eq. 3.107 \quad LCI = n\bar{p} - 3\sigma_{np} = 9,65 - 3 \times 3,03 = 0,56$$

Na Figura 3.41 apresenta-se um exemplo de carta para número de não-conformes.

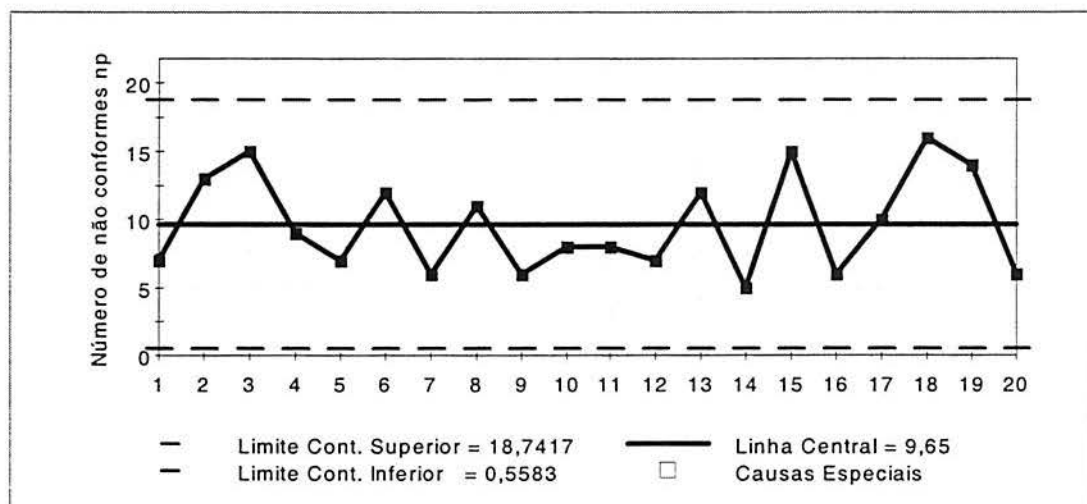


Figura 3.41 Carta  $np$  para o exemplo das peças plásticas.

Na Figura 3.42 apresenta-se a carta de controle  $p$  equivalente a  $np$ . Como se pode verificar, o comportamento da carta é o mesmo, mudando apenas a escala das cartas de controle.



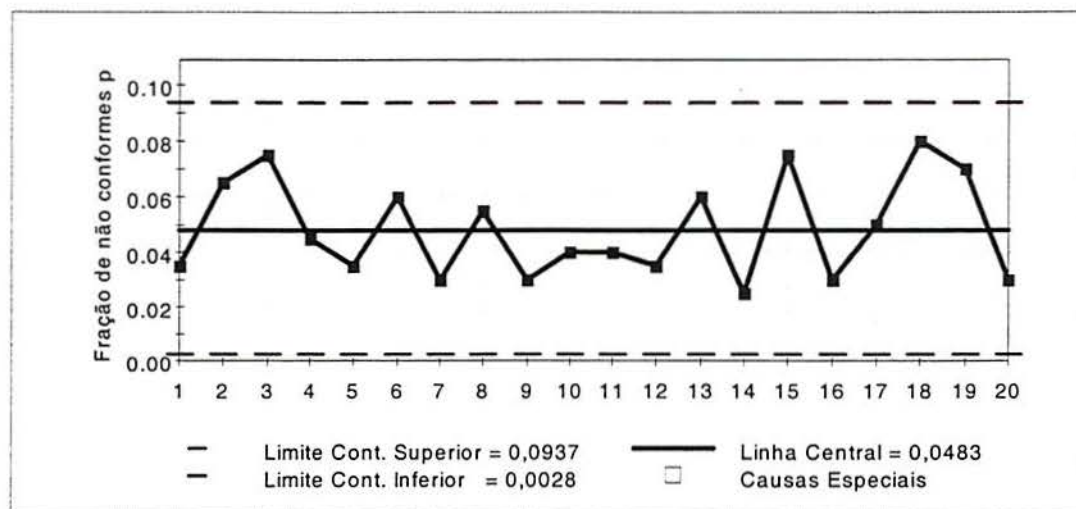


Figura 3.42 Carta  $p$  (equivalente a  $np$ ) para o exemplo das peças plásticas.

### 3.3.3 Carta $c$ para número de não-conformidades

A carta  $c$  monitora o número de não-conformidades (defeitos) verificados em um grupo. É importante não confundir os termos não-conforme e não-conformidade:

- a) não-conforme refere-se ao produto defeituoso;
- b) não-conformidades refere-se a defeitos em um produto.

A carta  $c$  é mais apropriada quando: a) os defeitos estão dispersos em um meio contínuo, como por exemplo: número de falhas por área de tecido, número de imperfeições por comprimento de pavimento e b) um produto pode apresentar mais de um tipo de defeito.

#### 3.3.3.1 Coleta de dados

Como o monitoramento é realizado considerando o número de defeitos, deve-se especificar o tamanho da amostra constante, ou seja, o número de unidades, ou a área em  $m^2$  ou o comprimento em  $m$  analisado a cada amostra. Então anota-se o número de não-conformidades verificado em cada amostra.

#### 3.3.3.2 Cálculo dos limites de controle

Inicialmente, calcula-se o número médio de não-conformidades:

$$\text{eq. 3.108} \quad \bar{c} = \frac{c_1 + c_2 + \dots + c_k}{k}$$

$$\text{eq. 3.109} \quad \sigma_c = \sqrt{\bar{c}}$$

onde:  $c_i$  é o número de não-conformidades na amostra  $i$ ;

$k$  é o número de subgrupos.

E após calcula-se os limites de controle para o número de não-conformidades:

$$\text{eq. 3.110} \quad LCS = \bar{c} + 3\sigma_c$$

$$\text{eq. 3.111} \quad LCI = \bar{c} - 3\sigma_c$$

### Exemplo da carta de controle para número de não-conformidades $c$

Os dados da Tabela 3.18 representam o número de defeitos de pintura (não-conformidades) observados na pintura da lataria de ônibus.

Tabela 3.18 Dados do exemplo da carta  $c$ .

Caverna	$c$	Caverna	$c$	Caverna	$c$	Caverna	$c$
1	4	6	12	11	1	16	6
2	0	7	9	12	7	17	17
3	8	8	5	13	5	18	13
4	14	9	9	14	15	19	8
5	4	10	21	15	4	20	11

Inicialmente, calcula-se o número médio de não-conformes:

$$\text{eq. 3.112} \quad \bar{c} = \sum c_i / k = 173/20 = 8,65$$

$$\text{eq. 3.113} \quad \sigma = \sqrt{\bar{c}} = \sqrt{8,65} = 2,94$$

E, logo após, os limites de controle para o número de não-conformidades:

$$\text{eq. 3.114} \quad LCS = \bar{c} + 3\sigma_c = 8,65 + 3 \times 2,94 = 17,47$$

$$\text{eq. 3.115} \quad LCI = \bar{c} - 3\sigma_c = 8,65 - 3 \times 2,94 = 0,00$$

Como o processo apresentou uma causa especial, deve-se recalcular os limites de controle eliminando a amostra 10.

$$\text{eq. 3.116 } LCS = 16,48$$

$$\text{eq. 3.117 } LCI = 0,00$$

Na Figura 3.43, apresenta-se um exemplo de carta para número de não-conformidades.

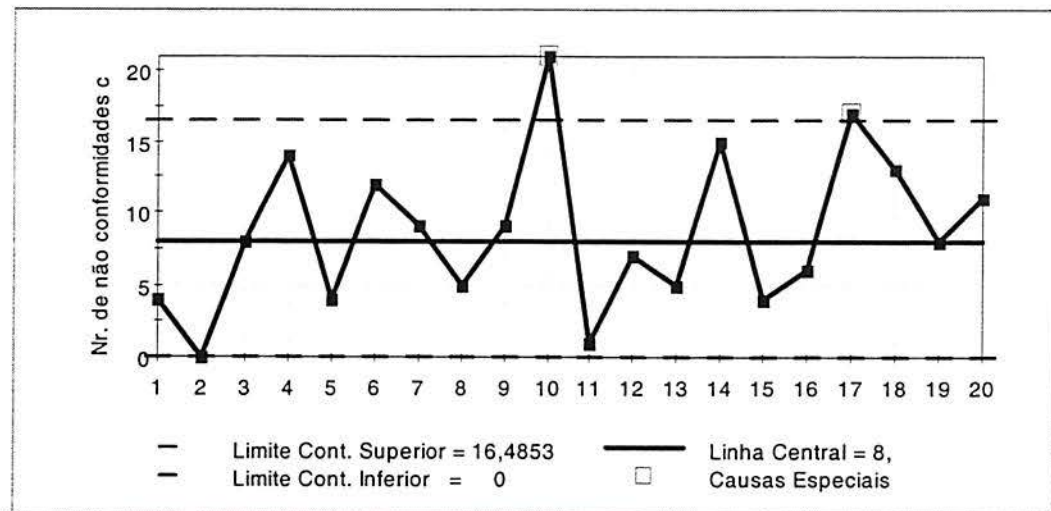


Figura 3.43 Carta c para o exemplo do número de defeitos de pintura.

### 3.3.4 Carta $u$ para número de não-conformidades por unidade

A carta  $u$  monitora o número de não-conformidades por unidade produzida. É similar a carta  $c$ , exceto que o número de não-conformidade é expresso em relação a cada unidade.

A carta  $u$  é útil quando a amostra contém mais de uma unidade (o valor de  $u$  tem um significado mais facilmente apreendido), e quando o tamanho da amostra varia.

#### 3.3.4.1 Coleta de dados

A amostras não precisam ter o mesmo tamanho (mas se esse for o caso, os cálculos ficam facilitados). Conta-se o número de não-conformidades ( $c$ ) da amostra e registra-se:

$$\text{eq. 3.118 } u = c/n$$



### 3.3.4.2 Cálculo dos limites de controle

Inicialmente, calcula-se o número médio de não-conformidades por unidade:

$$\text{eq. 3.119} \quad \bar{u} = \frac{c_1 + c_2 + \dots + c_k}{n_1 + n_2 + \dots + n_k}$$

$$\text{eq. 3.120} \quad \sigma_u = \sqrt{\frac{\bar{u}}{n_i}}$$

onde:  $c_i$  é o número de não-conformidades na amostra  $i$ ;

$n_i$  é o tamanho da amostra  $i$  e  $k$  é o número de subgrupos.

Em seguida, os limites de controle para o número de não-conformidades por unidade são calculados como:

$$\text{eq. 3.121} \quad LCS = \bar{u} + 3\sigma_u$$

$$\text{eq. 3.122} \quad LCI = \bar{u} - 3\sigma_u$$

Se houver diferenças nos tamanhos de subgrupo, também haverá diferenças nos limites de controle, que irão aparecer como uma linha dentada.

Se a diferença nos tamanhos de amostras for pequena (<25%), pode-se usar a média dos tamanhos de amostras. Dessa forma, o desvio-padrão será calculado, usando-se:

$$\text{eq. 3.123} \quad \sigma_u = \sqrt{\frac{\bar{u}}{\bar{n}}}$$

#### Exemplo da carta de controle para número de não-conformidades por unidade $u$

Os dados a seguir representam o número de defeitos superficiais observados em sapatos.

Tabela 3.19 Dados do exemplo da carta  $u$ .

Lote	nº de unidades	nº de não-conformidades	nº de não-conformidades por unidade ( $u$ )
1	10	13	1,30
2	10	11	1,10
3	10	8	0,80
4	12	20	1,67
5	12	15	1,25
6	10	10	1,00
7	10	13	1,30
8	12	19	1,58
9	8	15	1,88
10	8	9	1,13
<b>Soma</b>	<b>102</b>	<b>133</b>	

Inicialmente, calcula-se  $\bar{u}$  e  $\sigma_u$ , de acordo com:

$$eq. 3.124 \quad \bar{u} = \sum c_i / \sum n_i = 133/102 = 1,304$$

$$eq. 3.125 \quad \sigma_u = \sqrt{\frac{\bar{u}}{n}} = \sqrt{1,304/10,2} = 0,357 \text{ (ou variável)}$$

E logo após, calcula-se os limites de controle para o número de não-conformidades por unidade:

$$eq. 3.126 \quad LCS = \bar{u} + 3\sigma_u = 1,304 + 3 \times 0,357 = 2,376 \text{ (ou variável)}$$

$$eq. 3.127 \quad LCI = \bar{u} - 3\sigma_u = 1,304 - 3 \times 0,357 = 0,231 \text{ (ou variável)}$$

Na Figura 3.44, apresenta-se um exemplo de carta para número de não-conformidades por unidade.

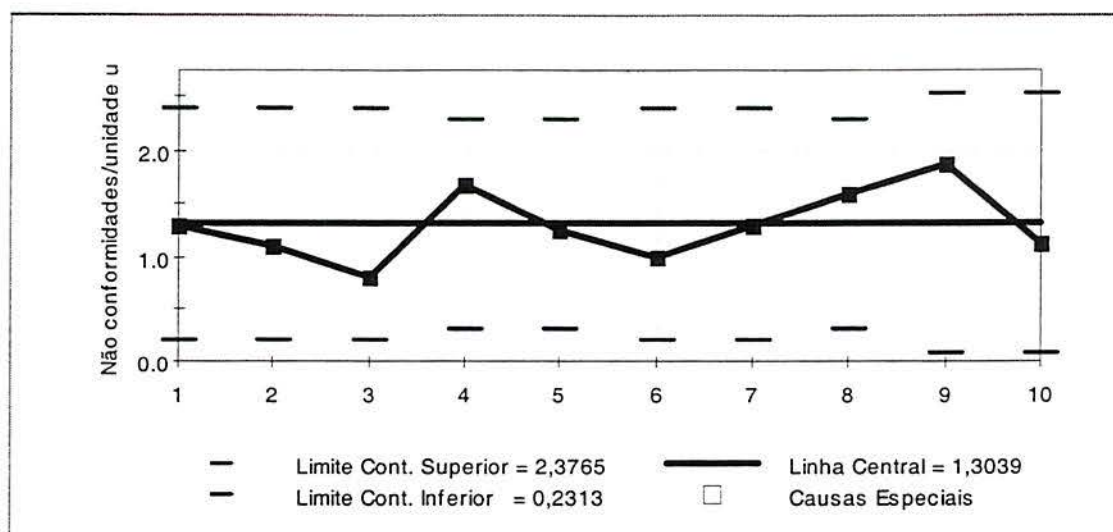


Figura 3.44 Carta  $u$  para o exemplo do número de defeitos superficiais por unidade.

### 3.3.5 Escolha do tipo de carta de controle

Na Figura 3.45, apresenta-se um fluxograma que auxilia na escolha do tipo de carta de controle a ser utilizada no monitoramento de atributos.

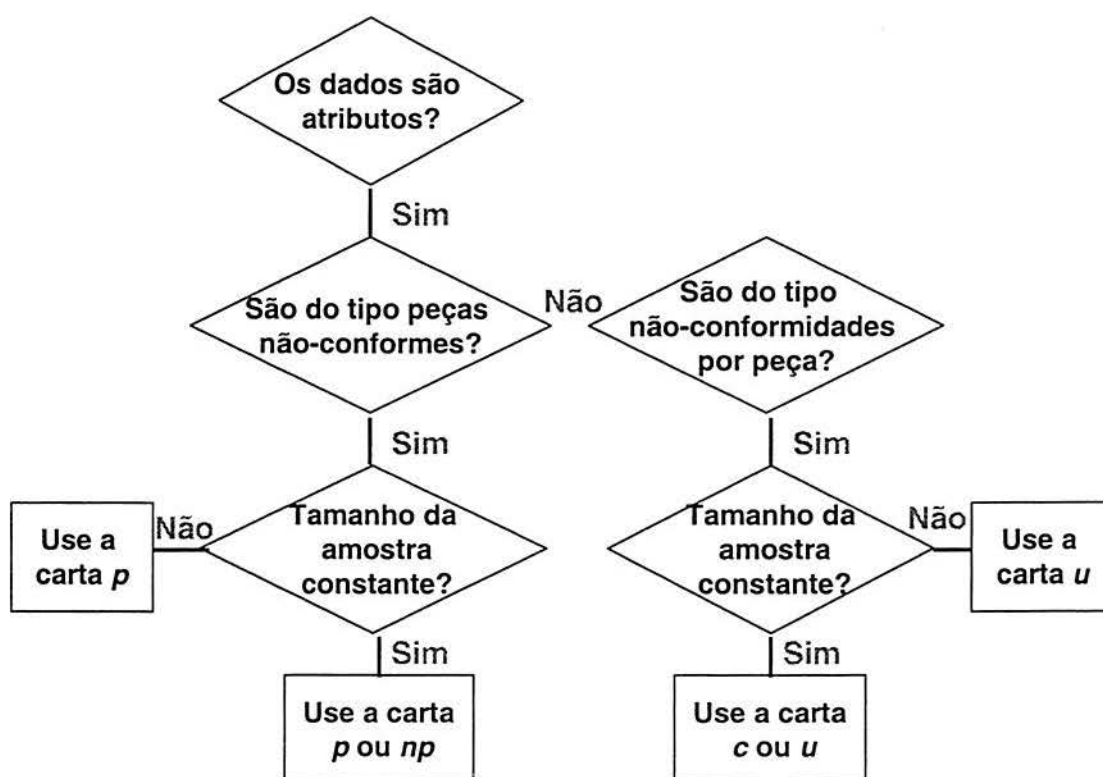


Figura 3.45 Fluxograma de apoio para escolha das cartas de controle.



### 3.4 Carta de controle multivariada

O controle estatístico é uma ferramenta de monitoramento das variáveis de um processo. No entanto, a estratégia de usar cartas de controles separadas para monitorar variáveis de um processo que estejam correlacionadas não é correta, pois a probabilidade  $\alpha$  de alarme falso, ou seja, a probabilidade de sinalizar uma causa especial indicando que o processo alterou quando na verdade não se alterou, fica mal avaliada.

Os métodos multivariados são uma alternativa para monitorar processos cujas variáveis estejam correlacionadas, pois consideram a estrutura de correlação entre elas. Entre os métodos multivariados estão a estatística de *Hotelling*  $T^2$ , os gráficos de soma acumulada multivariada (MCUSUM) e o gráfico de média móvel exponencialmente ponderada multivariada (MEWMA).

Segundo Mason e Young (1998), um método multivariado muito popular é a estatística de *Hotelling*  $T^2$ , que fornece um valor univariado considerando a estrutura de correlação entre as variáveis. A estatística de *Hotelling*  $T^2$  será exemplificada a seguir com o caso mais simples de apenas duas variáveis de processo correlacionadas.

$$eq. 3.128 \quad T^2 = (X - \mu)' \Sigma^{-1} (X - \mu)$$

onde:

$X' = (x_1, x_2)$  representa o vetor transposto dos valores observados das duas variáveis;

$\mu' = (\mu_1, \mu_2)$  representa o vetor das médias das duas variáveis;

$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 \end{bmatrix}$  representa a matriz de covariância calculada baseada nos dados;

$\sigma_1^2$  e  $\sigma_2^2$  representam a variância das duas variáveis;

$\sigma_{12} = \sigma_{21}$  representam a covariância entre as duas variáveis;

$\rho = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \sigma_2}$  representa a correlação entre as duas variáveis.

Os limites de controle representados por uma elipse são calculados igualando a estatística  $T^2$  a uma constante  $c$  igual ao limite de controle superior. Todos os pontos dentro da região elíptica têm uma distância  $T^2 < c$ .

Pode-se observar na Figura 3.46 que os limites de controle das cartas de controle considerando as duas variáveis independentemente são representados por uma região retangular (linha tracejada), enquanto que os limites de controle da carta multivariada considerando a correlação entre as variáveis são representados por uma região elíptica (linha cheia).

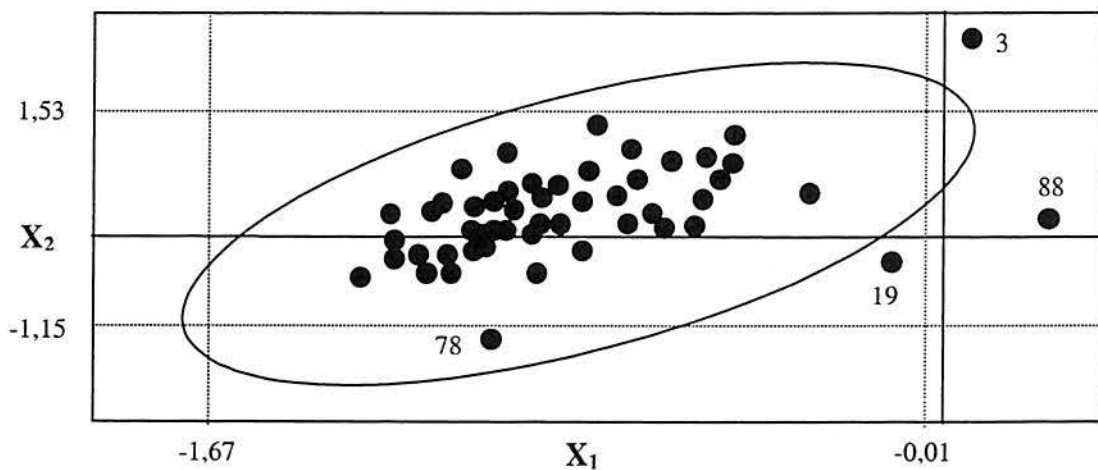


Figura 3.46 Exemplo de carta multivariada para duas variáveis.

As duas cartas indicam três causas especiais, no entanto as cartas univariadas detectam os pontos 3, 78 e 88 e a carta multivariada detecta os pontos 3, 19 e 88. O ponto 19 é detectado como causa especial na carta multivariada pois não apresenta correlação positiva entre as duas variáveis como era de se esperar, ou seja, o ponto 19 apresenta valores altos de  $X_1$  e valores baixos de  $X_2$ .

Quando monitora-se  $p > 3$  variáveis simultaneamente, não é possível representar graficamente, logo monitora-se a estatística  $T^2$ , que consolida em um único valor toda a informação a respeito das  $p$  variáveis, como se fosse uma carta univariada. Quando o valor da estatística  $T^2$  estiver abaixo do limite de controle superior (constante  $c$ ), todas as variáveis estão se comportando dentro do esperado. Quando um ponto estiver acima do limite de controle superior, alguma das variáveis saiu fora de seu padrão natural de operação, no entanto não se sabe qual delas.



Lowry e Montgomery (1995) fizeram uma revisão dos métodos multivariados, concentrando-se nos desenvolvimentos desde a metade dos anos oitenta. Alt *apud* Lowry e Montgomery (1995) descreveu o uso da carta de controle de *Hotelling*  $T^2$  para monitorar a média e gráficos para monitorar a variabilidade do processo na Fase I e II. Ele distinguiu entre o uso dos gráficos para testar se o processo estava sob controle quando os primeiros subgrupos foram plotados (Fase I) e o uso dos gráficos para testar se o processo continua sob controle quando os subgrupos futuros serão plotados (Fase II). Jackson *apud* Lowry e Montgomery (1995) discutiu a carta de controle de *Hotelling*  $T^2$  e propôs uma analogia multivariada para o gráfico de CUSUM e critérios de amostragem multivariada. Ele propôs também o uso de componentes principais para gráficos de controle, onde a estatística  $T^2$  é decomposta em um somatório de componentes principais que são combinações lineares das variáveis originais. Enquanto Alt (1984) e Jackson (1985) fizeram uma revisão da literatura do início dos anos oitenta, o artigo de Lowry e Montgomery (1995) concentrou-se na discussão de várias questões importantes na escolha dos limites de controle para a estatística de *Hotelling*  $T^2$ , na comparação entre a soma acumulada multivariada (MCUSUM) e a média móvel exponencialmente ponderada multivariada (MEWMA), nos gráficos de controle para variabilidade do processo, na interpretação dos sinais fora-de-controle, no ajuste de regressão para controle de qualidade multivariado, no uso de componentes principais para monitoramento e na revisão de artigos mais recentes que discutem esses aspectos.

Mason *et alli* (1997) fizeram uma avaliação dos métodos multivariados, das questões que devem ser consideradas na sua implantação e nos problemas ainda existentes no seu uso.

Segundo Mason *et alli* (1997), existem muitas questões que necessitam ser consideradas no uso de técnicas de controle estatístico multivariado para monitorar processos industriais. Uma questão é que o uso das cartas de controle multivariadas é baseado na suposição de independência e distribuição Normal multivariada dos dados e na suposição de que a matriz de correlação entre as variáveis é constante ao longo do tempo. Outra questão é que as cartas de controle multivariadas não fornecem a informação que o operador precisa, um sinal de processo fora de controle significa que uma (ou mais de uma) variável do processo se alterou, sendo necessário ainda descobrir qual delas.

Fuchs e Benjamini *apud* Mason *et alli* (1997) fizeram uma revisão de vários métodos para mostrar simultaneamente um gráfico multivariado e vários gráficos univariados. Eles propuseram um método chamado de gráfico de perfis (*profile*) multivariado que plota uma



barra vertical na altura do valor de  $T^2$  apresentando os valores das várias estatísticas univariadas.

Mason, Tracy e Yong *apud* Mason *et alli* (1997) propuseram decompor a estatística  $T^2$  em  $p$  componentes independentes que fornecem informações das variáveis que estão contribuindo de forma significativa para o sinal fora de controle. A decomposição é apresentada como segue:

$$\text{eq. 3.129} \quad T^2 = T_i^2 + \sum_{j=1}^{p-1} T_{j+1.1, \dots, j}^2$$

onde:

$T_i^2$  é o quadrado da estatística  $T$  para as variáveis iniciais;

$T_{j+1.1, \dots, j}^2$  é o quadrado da  $(j+1)^{\text{st}}$  variável ajustada pela estimativa da média e desvio-padrão da distribuição condicional das  $(j+1)^{\text{st}}$  variáveis dadas as primeiras  $j$  variáveis.

Cada um dos termos deve ser comparado com uma distribuição  $F$ . A desvantagem deste método é que para valores altos de  $p$ , o número de decomposições é muito grande sendo necessário auxílio computacional.

Kourti e MacGregor (1996) propuseram uma nova abordagem baseada em análise dos componentes principais (PCA). O objetivo de usar componentes principais é reduzir o número de dados altamente correlacionados para poucos *scores* resumo dos componentes principais, que são combinações lineares dessas variáveis. O monitoramento do processo é realizado com a estatística multivariada expressa em termos dos *scores* resumo dos componentes principais normalizados de variáveis com distribuição normal multivariada. Quando aparece um sinal fora de controle, os valores de *scores* normalizados mais altos são detectados e, então, usa-se gráficos de sensibilidade para encontrar as variáveis responsáveis pelo sinal fora de controle. Os gráficos de sensibilidade indicam o quanto cada variável contribui para gerar aquele *score* alto.

Scott, Scott e Arnon (1998) propuseram um método para o controle estatístico do processo usando dados em tempo real para aplicações em processos cujas características do produto final dependem das condições iniciais, processados com um tempo de duração finito sob certas condições de operação. O método apresentado por Scott, Scott e Arnon (1998)

generaliza a aplicação do método de monitoramento apresentado por Nomikos e MacGregor (1995). Uma contribuição importante desse método é a possibilidade de monitorar processos que apresentam condições iniciais diferentes em cada nova rodada, pois sabe-se que alterando-se as condições iniciais de um processo, altera-se as características de qualidade do produto final. O monitoramento do processo é realizado através da previsão das condições de operação para uma determinada condição inicial, e fornece um sinal estatístico toda vez que as condições de operação estão estatisticamente diferentes dos valores previstos. A previsão das condições de operação para uma determinada condição inicial é realizada através de um modelo construído a partir de dados históricos ou de um projeto de experimento que relaciona as condições iniciais com os *scores* resumo dos componentes principais.

## **4    CONTROLE INTEGRADO DA QUALIDADE DE PROCESSOS DE MANUFATURA DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS**

Nessa seção será apresentada uma proposta para o controle estatístico integrado da qualidade de processos de manufatura de revestimentos cerâmicos baseado nos princípios de controle estatístico de processo (CEP).

O controle estatístico integrado da qualidade de processos de manufatura de revestimentos cerâmicos, de agora em diante denominado simplesmente de controle integrado da qualidade, é uma estratégia de monitoramento e garantia da qualidade. Ele tem como principal característica a utilização conjunta de dados acerca da situação do produto e processo, com vistas a promover um controle integrado da qualidade e transformar medições quantitativas de variáveis e atributos em índices agregados de desempenho de processo. Essencialmente baseado em princípios do controle estatístico de processo, o controle integrado da qualidade foi desenvolvido para utilização em ambientes produtivos onde um grande número de variáveis devam ser monitoradas.

O controle integrado da qualidade se desenvolve a partir de dois elementos chaves: o banco de dados integrado e as cartas integradas. Na medida em que as informações de qualidade são muito volumosas, esses elementos devem, necessariamente, ser gerenciados através de um *software* desenvolvido para tanto.

O banco de dados integrado guarda toda a informação referente à qualidade, a qual costumeiramente é coletada nas empresas, mas encontra-se dispersa em vários setores, arquivos, formulários, planilhas, etc. Vale dizer que os dados de qualidade propriamente ditos (medições de variáveis e atributos) podem ser registrados conjuntamente com informações sobre turnos, máquinas, operadores, origem de matérias-primas, etc., possibilitando, através do uso do *software*, a recuperação das informações filtradas de acordo com esses critérios ou outros que venham a ser utilizados.



No controle integrado da qualidade, a linha de produção é dividida em um certo número de postos de controle. O controle da qualidade em cada posto de controle é realizado com base na carta de controle integrada do posto, que permite o monitoramento conjunto, em uma única carta de controle, de todas as variáveis e atributos pertinentes àquele posto.

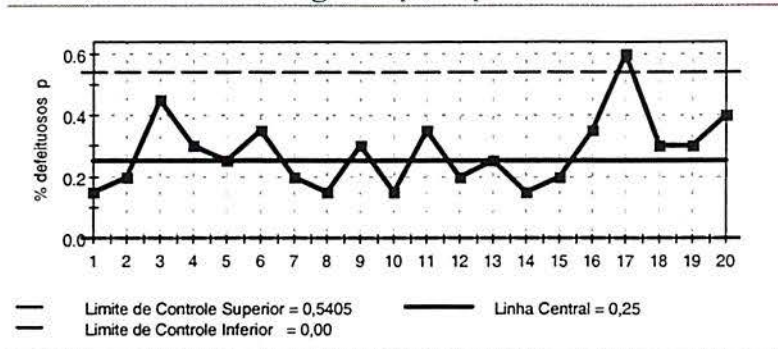
O controle integrado da qualidade atinge objetivos que são paradoxais sob o ponto de vista das técnicas tradicionais de controle estatístico. A carta de controle integrada permite o monitoramento conjunto de atributos e variáveis; recuperando poder do teste estatístico e reduzindo o tamanho das amostras. Com isso, diminui radicalmente o esforço necessário à análise e interpretação dos dados de qualidade. O banco de dados da qualidade propicia um acesso total às informações referentes à qualidade dos processos e produtos, filtradas de acordo com critérios definidos pelo usuário. Com isso, disponibiliza uma visão macro da qualidade dos postos de controle e da linha de produção como um todo.

No item 4.1 deste capítulo, serão apresentados os fundamentos do controle integrado da qualidade. Mais especificamente no item 4.1.1, é apresentada a carta integrada para o posto; no item 4.1.2, é descrito o gráfico de Pareto por posto; no item 4.1.3, são discutidas as cartas individuais para cada característica de qualidade; no item 4.1.4, é descrita a carta integrada global; no item 4.1.5, é apresentado o gráfico de Pareto global e no item 4.1.6, é apresentada a carta de custos da má qualidade. No item 4.2, é apresentada uma abordagem sistemática, em cinco etapas, para a implantação do controle integrado da qualidade. Mais especificamente no item 4.2.1, é discutida a definição do projeto; no item 4.2.2, é discutido o planejamento da implantação; no item 4.2.3, é discutido o treinamento, no item 4.2.4 é discutida a implantação propriamente dita e, finalmente, no item 4.2.5 é discutido o acompanhamento e consolidação do controle integrado da qualidade. Por fim, no item 4.3 são comentadas algumas situações onde o controle integrado não é adequado.

## **4.1 Fundamentos do controle integrado da qualidade**

A estratégia do controle integrado da qualidade é priorizar a produção enquanto o processo se comportar naturalmente. No entanto, quando um ponto aparece fora dos limites de controle, ou seja, sai fora do padrão natural de qualidade do processo, então deve ser tomada uma ação corretiva. Para dar suporte à tomada de decisão, é usado um gráfico de Pareto que apresenta, hierarquizados, as variáveis e atributos que estão contribuindo mais pronunciadamente para a perda de qualidade (ver Figura 4.1).

### Carta de controle integrada para o posto de controle

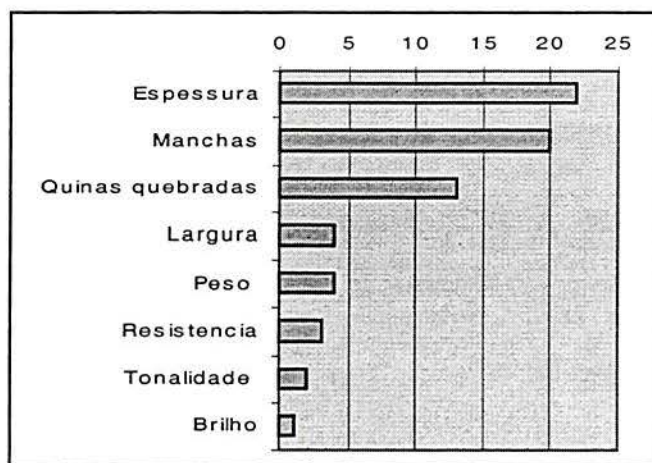


**Sinal estatístico**  
(ponto fora dos limites de controle)

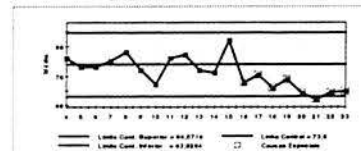
Necessidade de analisar o Pareto com os percentuais de defeituosos associados a cada variável ou atributo

**Cartas individuais:** auxílio na análise e detecção do problema

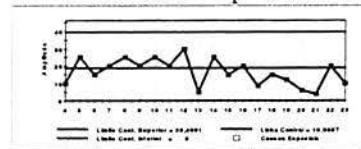
**Pareto** priorizando variáveis e atributos a serem investigados



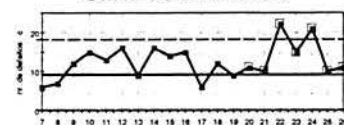
### Carta de Médias



### Carta de Amplitude



### Carta de Defeitos c



### Carta de Defeitos c

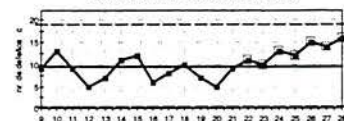


Figura 4.1 Estratégia de ação do controle integrado da qualidade.

Após a identificação, com o auxílio do gráfico de Pareto, das variáveis e atributos que estão apresentando um pior desempenho, as suas cartas de controle individuais também podem ser acessadas, uma vez que esta informação está disponível no banco de dados da qualidade. A análise dessas cartas irá revelar se os problemas estão associados a causas comuns ou especiais, dirigindo a tomada de decisão e as ações correspondentes. Ou seja, ao mesmo tempo que tem-se uma carta que apresenta aspectos globais do posto de controle, proporcionando maior agilidade no monitoramento da qualidade, é possível acessar cartas de controle específicas para cada característica de qualidade quando necessário.

Para fins gerenciais, é interessante acompanhar também uma carta de controle



integrada global que monitora, em uma única carta, o conjunto de variáveis e atributos de todos os postos de controle da linha de produção.

O uso e a interpretação da carta de controle integrada global é o mesmo das cartas usadas nos postos de controle: quando uma amostra sai fora dos limites de controle da carta integrada global, consulta-se o gráfico de Pareto global, que permite identificar quais as variáveis e atributos, e seus respectivos postos, que estão provocando a alteração no padrão natural de operação da linha de produção como um todo.

A carta de controle integrada global fornece uma visão macro e é importante para o gerente da linha de produção, enquanto que as cartas dos postos de controle são importantes para os operadores e supervisores responsáveis pelas operações no posto respectivo.

#### **4.1.1 Carta de controle integrada por posto**

A carta de controle integrada por posto monitora simultaneamente as variáveis e atributos que medem o desempenho do setor contemplado pelo posto. Essa carta é uma carta  $p$  que monitora o percentual de defeituosos do posto de controle, independente de se monitorar variáveis ou atributos.

Escolheu-se como parâmetro comum entre atributos e variáveis o percentual de defeituosos, por ser essa estatística uma linguagem bastante comum e de fácil compreensão por parte dos profissionais que irão executar o controle integrado da qualidade. Outra opção poderia ser a função de perda quadrática multivariada, que penaliza toda vez que uma característica se distancia do seu valor alvo, porém esse conceito ainda não é muito difundido no meio empresarial. Para maiores informações sobre função de perda quadrática multivariada ver, por exemplo, Byrne e Taguchi (1987), Taguchi e Clausing (1990), Caten e Ribeiro (1995), Caten e Ribeiro (1996), Ribeiro e Caten (1996) e Ribeiro e Caten (1996c).

O percentual de defeituosos do posto de controle é a soma, em uma única carta de controle, do percentual de defeituosos correspondente a cada variável ou atributo que estão sendo monitorados.

O cálculo do percentual de defeituosos associado a uma variável  $k$  é realizado comparando-se a distribuição de probabilidade da variável  $k$  com seus respectivos limites de especificação e estimando-se o percentual de peças fora de especificação para um subgrupo  $j$ .

O cálculo do percentual de defeituosos associado a um atributo  $k$  para um subgrupo  $j$  é realizado quantificando-se a frequência de cada defeito (atributo) naquele subgrupo  $j$ , multiplicando-se pela sua respectiva gravidade (alguns defeitos já caracterizam o produto



como defeituoso, outros precisam aparecer um certo número de vezes para caracterizar o produto como defeituoso) e dividindo-se pelo tamanho da amostra do subgrupo  $j$ .

#### 4.1.1.1 Cálculo do percentual de defeituosos associado a uma variável $k$

O cálculo do percentual de defeituosos associado a uma característica de qualidade (variável)  $k$  é realizado calculando-se primeiramente a média e o desvio-padrão móveis para a variável em questão. Utiliza-se a média e desvio-padrão móvel a fim de quantificar com maior precisão a tendência central e a variabilidade da variável  $k$  nos diversos subgrupos  $j$ .

O formulário que será apresentado a seguir baseia-se em uma janela triangular para o cálculo da média móvel.

- Média móvel da variável  $k$  para o subgrupo  $j$  ( $mm_{k,j}$ ):

$$eq. 4.1 \quad mm_{k,j} = \frac{\sum_{i=1}^I i \times m_{k,j-I+i}}{\sum_{i=1}^I i}$$

- Desvio-padrão móvel da variável  $k$  para o subgrupo  $j$  ( $dm_{k,j}$ ):

$$eq. 4.2 \quad dm_{k,j} = \frac{\sum_{i=1}^I i \times d_{k,j-I+i}}{\sum_{i=1}^I i}$$

onde:  $k$  refere-se às característica de qualidade (variáveis) que podem variar de  $1, \dots, K$ ;

$j$  refere-se aos subgrupo (amostras) que podem variar de  $1, \dots, J$ ;

$i$  refere-se aos passos da média móvel que podem variar de  $1, \dots, I$ ;

$mm_{k,j}$  = média móvel da variável  $k$  e subgrupo  $j$ ;

$dm_{k,j}$  = desvio-padrão móvel da variável  $k$  e subgrupo  $j$ ;

$m_{k,j-I+i}$  = média da variável  $k$  e subgrupo  $j-I+i$ ;

$d_{k,j-I+i}$  = desvio da variável  $k$  e subgrupo  $j-I+i$ .

Em função da janela triangular, que não fornece peso 1 para todas as observações, e sim pesos decrescentes, é preciso calcular o tamanho da amostra para a média e desvio-padrão móveis da variável  $k$  ( $n_k$ ):

$$eq. 4.3 \quad n_k = \sum_{i=1}^I \frac{i}{I} \times nsub_k$$

onde:  $nsub_k$  = tamanho do subgrupo da variável  $k$ .

Uma vez conhecida a distribuição de probabilidade da variável  $k$  e sua respectiva média e desvio-padrão móveis para um determinado subgrupo  $j$ , é possível estimar o percentual de defeituosos comparando essa distribuição com os respectivos limites de especificação da variável  $k$ .

Supondo que a variável siga a distribuição Normal, calcula-se a variável reduzida  $Z$ . Conhecido o valor de  $Z$ , consulta-se a distribuição Normal Padronizada acumulada (disponível em tabelas ou em algoritmos computacionais) e estima-se o percentual de defeituosos associado à variável  $k$  para o subgrupo  $j$ .

Caso a variável não siga a distribuição Normal, calcula-se o percentual de defeituosos usando-se as fórmulas (ou tabelas) da respectiva distribuição de probabilidade.

O percentual de defeituosos associado a uma variável  $k$  que segue a distribuição Normal é calculado conforme segue.

- Variável reduzida  $Z$  para o limite de especificação inferior ( $Z_{inf,k,j}$ ):

$$eq. 4.4 \quad Z_{inf,k,j} = \frac{LEI_k - mm_{k,j}}{dm_{k,j}}$$

onde:  $LEI_k$  = Limite de especificação inferior da variável  $k$ .

- Percentual de defeituosos abaixo do limite de especificação inferior ( $P_{inf,k,j}$ ):

$$eq. 4.5 \quad \text{Distribuição Normal acumulada} \rightarrow P_{inf,k,j} = P(Z_{inf,k,j})$$

- Variável reduzida  $Z$  para o limite de especificação superior ( $Z_{sup,k,j}$ ):

$$eq. 4.6 \quad Z_{sup,k,j} = \frac{LES_k - mm_{k,j}}{dm_{k,j}}$$

onde:  $LES_k$  = Limite de especificação superior da variável  $k$ .

- Percentual de defeituosos acima do limite de especificação superior ( $P_{sup_{k,j}}$ ):

Usando a distribuição Normal acumulada, tem-se:

$$eq. 4.7 \quad P_{sup_{k,j}} = 1 - P(Z_{sup_{k,j}})$$

- Percentual de defeituosos associado a uma variável  $k$  e subgrupo  $j$  ( $P_{def_{k,j}}$ )

$$eq. 4.8 \quad P_{def_{k,j}} = P_{inf_{k,j}} + P_{sup_{k,j}}$$

Foi realizado um estudo de simulação que demonstrou que os percentuais de defeituosos inferidos a partir de médias móveis seguem com excelente aproximação o modelo Binomial. Na sequência, segue um exemplo de inferência da quantidade de defeituosos usando uma janela móvel que cobre 50 observações. As barras representam os valores simulados (500 valores) e a curva contínua é o ajuste feito através da Binomial. Como pode ser observado, o ajuste é bastante adequado, confirmado que o comportamento dos percentuais inferidos segue o modelo Binomial.

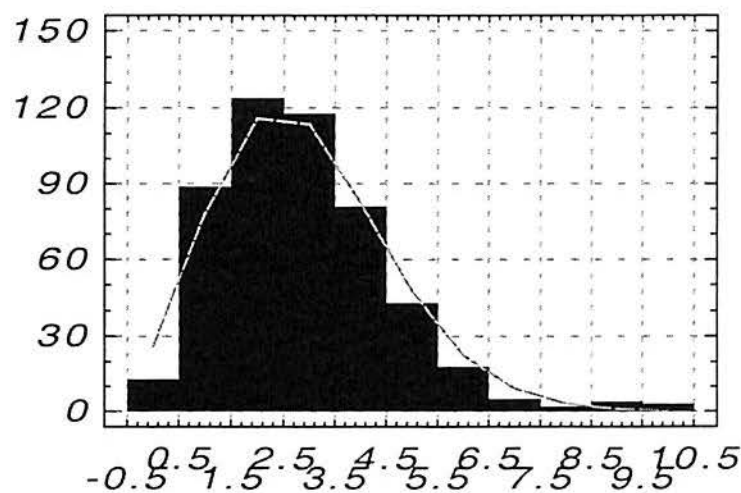


Figura 4.2 Histograma do estudo de simulação.

Observa-se que as especificações usadas no controle integrado da qualidade podem ser mais rigorosas que as especificações exigidas pelo cliente. Assim, o controle integrado da qualidade pode incorporar a prática comum na indústria de utilizar  $C_p > 1,33$  ou  $C_p > 1,66$  para fins de diagnóstico da qualidade.

#### 4.1.1.2 Cálculo do percentual de defeituosos associado a um atributo $k$

O cálculo do percentual de defeituosos associado a um atributo  $k$  para um subgrupo  $j$



é realizado multiplicando-se a frequência de cada defeito (atributo) naquele subgrupo  $j$  pela sua respectiva gravidade e dividindo-se pelo tamanho da amostra.

A gravidade do defeito é definida de forma a ponderar quantos defeitos em uma peça caracterizam um produto defeituoso. Por exemplo, se o peso é 1, apenas um defeito na peça já caracteriza o produto como defeituoso, mas se o peso é 0,2, são necessários cinco defeitos na peça para caracterizar um produto defeituoso.

O percentual de defeituosos associado a um atributo  $k$  é calculado conforme segue.

- Percentual de defeituosos associado a um atributo  $k$  e subgrupo  $j$  ( $Pdef_{k,j}$ ):

$$eq. 4.9 \quad Pdef_{k,j} = \frac{g_k \times c_{k,j}}{n_k}$$

onde:

$c_{k,j}$  = quantidade do atributo  $k$  observado no subgrupo  $j$ ;

$g_k$  = gravidade do atributo  $k$  (peso vindo da matriz de priorização);

$n_k$  = tamanho do subgrupo associado ao monitoramento do atributo  $k$ .

#### 4.1.1.3 Cálculo do percentual de defeituosos do posto de controle

O percentual de defeituosos do posto de controle para cada subgrupo  $j$  é calculado somando-se o percentual de defeituosos de todas as características de qualidade que estão sendo monitoradas naquele posto, independente de serem variáveis ou atributos.

Vale mencionar que, fisicamente, a carta integrada monitora um percentual de defeituosos, que é regido pela distribuição Binomial. Matematicamente, esse percentual de defeituosos é calculado como uma soma de probabilidades:  $Pr\{E1+E2\} = Pr\{E1\} + Pr\{E2\} - Pr\{E1 E2\}$  (essa fórmula supõe independência entre as variáveis). Quando há muitos termos, essa soma de probabilidades pode ser calculada mais facilmente usando o produtório:  $Pr\{E1 + E2\} = 1 - (1-Pr\{E1\})(1-Pr\{E2\})$ .

Também foi estudado, através de simulação, o comportamento da soma de probabilidades de diversos percentuais de defeituosos e verificou-se que o comportamento da soma segue aproximadamente o modelo Binomial. Segundo Jones, Wodall e Conerly (1999), a soma ponderada de defeitos segue uma distribuição Lattice. No entanto, na carta integrada realiza-se uma soma de percentual de defeituosos. De qualquer forma, essas duas distribuições tendem à distribuição Normal quando a soma tem muitos termos e/ou quando os percentuais são elevados.

O percentual de defeituosos do posto de controle é calculado conforme segue.

- Percentual de defeituosos medido no posto de controle para subgrupo  $j$  ( $Pdef_j$ ), utilizando-se as fórmulas tradicionais de soma de probabilidade para eventos independentes:

$$eq. 4.10 \quad Pdef_j = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - Pdef_{k,j})$$

- onde:  $k$  refere-se às característica de qualidade (atributos ou variáveis) existentes em um posto, que podem variar de  $1, \dots, K$ ;  
 $j$  refere-se aos subgrupo (amostras) que podem variar de  $1, \dots, J$ .

#### 4.1.1.4 Cálculo dos limites de controle da carta do controle integrado da qualidade (carta $p$ ) do posto

O cálculo dos limites de controle para a carta do controle integrado da qualidade (carta  $p$ ) do posto de controle é realizado aproximando-se a distribuição Binomial (distribuição teórica) pela distribuição Normal. A aproximação da distribuição Binomial pela Normal (e o uso de limites de controle do tipo  $\pm 3$  sigma) pode ser empregada devido ao grande número de variáveis e atributos utilizados no controle integrado. Vale lembrar que, pelo teorema do limite central, a distribuição da soma tende ao modelo Normal, sendo que a aproximação melhora à medida que aumenta o número de termos.

Sugere-se que os limites de controle da carta integrada do posto sejam calculados com base em um período onde todas as variáveis e atributos aparecem em situação de controle estatístico.

A carta do controle integrado da qualidade do posto é calculada conforme segue.

- Percentual de defeituosos médio ( $\bar{P}def$ ):

$$eq. 4.11 \quad \bar{P}def = \frac{\sum_{j=1}^J Pdef_j}{J}$$

- Desvio-padrão do percentual de defeituosos, conforme distribuição Binomial ( $\sigma_p$ ):

$$eq. 4.12 \quad \sigma_p = \sqrt{\bar{P}def \times (1 - \bar{P}def) / N}$$

- Tamanho de amostra para o posto de controle ( $N$ ):



$$\text{eq. 4.13} \quad N = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K n_k^e$$

onde:  $n_k^e$  = é o tamanho de amostra equivalente, o qual será explicado a seguir.

A carta integrada supõe que os tamanhos de amostra equivalentes usados no monitoramento dos percentuais de defeituosos de todos os atributos e variáveis sejam aproximadamente os mesmos. Isso é necessário para assegurar aproximadamente o mesmo peso para todos os atributos e variáveis que estão construindo a carta integrada.

No caso de atributos, isso muitas vezes irá acontecer automaticamente, pois estará sendo usada a mesma amostra para verificar a existência de riscos, manchas e outros defeitos.

No entanto, as amostras de variáveis (resultados de médias móveis e desvios móveis) são usadas para fazer inferências a respeito do percentual de defeituosos que está sendo gerado para o item em questão.

Para o melhor funcionamento da carta integrada, esse percentual de defeituosos deveria estar sendo estimado com o mesmo erro (mesma variabilidade) que as amostras de atributo geram. Então, surge a questão de dimensionar as janelas das médias móveis de modo a constituir amostras que gerem estimativas de percentuais com erros similares àqueles que estão sendo gerados nas amostras de atributos.

Foi realizado um estudo de simulação para verificar o comportamento dos percentuais de defeituosos provenientes de contagem direta de defeituosos, no caso de atributos, e dos percentuais de defeituosos provenientes de inferências a partir da média e desvio-padrão móveis da amostra, no caso de variáveis.

### Estudo de simulação

Explicando melhor o estudo de simulação: imagine que um processo gera peças com espessuras que se distribuem de acordo com o modelo Normal e onde verifica-se 3% de defeituosos. Se uma amostra de 100 peças for avaliada através de um dispositivo passa-não-passa, o esperado é que se verifique 3% de defeituosos com um desvio-padrão de  $\sigma_p = \sqrt{p \times (1 - p) / n} = \sqrt{0,03 \times (1 - 0,03) / 100} = 0,017$ .

No entanto, qual seria o comportamento esperado do percentual de defeituosos se todas as peças fossem medidas, gerando uma média e um desvio-padrão e então estimando-se o percentual de defeituosos? A média dos defeituosos resultaria em 3%, pois o problema foi definido assim; mas qual seria a variabilidade observada neste percentual?



Para responder a essa pergunta, foi feito um estudo de simulação, envolvendo a simulação de 500 amostras de 100 peças, de modo a poder verificar como se apresenta a variabilidade do percentual inferido. Esse estudo foi repetido várias vezes para diferentes tamanhos de amostra e percentuais de defeituosos, gerando os resultados de eficiência que aparecem na Figura 4.3.

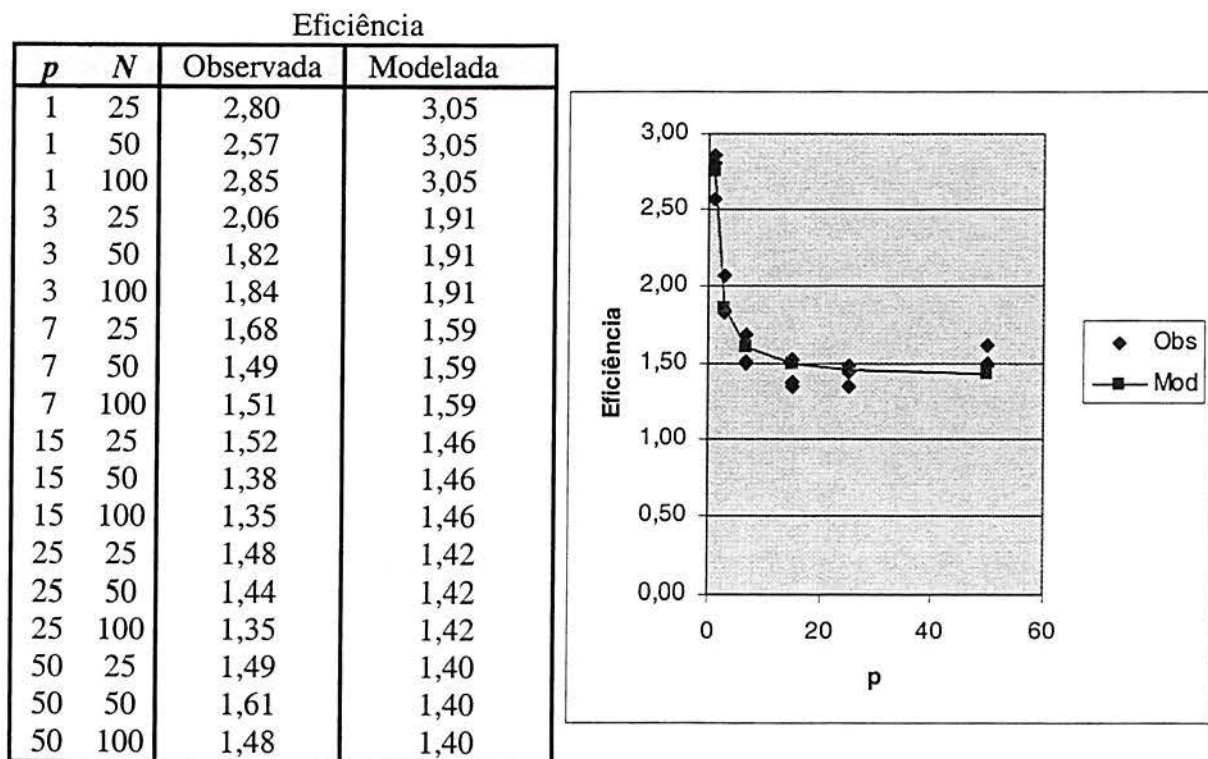


Figura 4.3 Valores de eficiência: relação entre a variabilidade do % defeituosos obtida a partir da contagem de defeituosos e inferida a partir do uso das médias e desvios móveis.

A coluna de eficiência observada refere-se à relação entre as variâncias do percentual obtida a partir da contagem de defeituosos e aquela inferida a partir do uso das médias e desvios móveis. A coluna de eficiência modelada foi obtida usando a seguinte equação de regressão não-linear:

$$\text{eq. 4.14} \quad \text{Eficiência} = 1,33 + 170 / (p \times (100 - p))$$

Em todos os casos, a inferência a partir de média e desvio-padrão mostrou menor variabilidade (eficiência maior que 1) do que a contagem direta de defeituosos. Como pode ser visto, não foi detectada nenhuma influência do tamanho da amostra, mas apenas do próprio percentual de defeituosos.

Assim, para o caso da espessura comentado anteriormente com percentual de defeituosos de 3 %, uma janela móvel que contemplasse  $100/1,91 = 52,36$  observações geraria

estimativas do percentual de defeituosos tão precisas como aquela que seria obtida a partir da contagem direta de defeituosos usando um dispositivo passa-não-passa em uma amostra de tamanho 100.

Resumindo, para fins de composição da carta integrada, os tamanhos de amostras das variáveis contempladas pelas janelas móveis devem ser corrigidos gerando um tamanho de amostra equivalente, qual seja:

$$eq. 4.15 \quad n_k^e = n_k \times \text{eficiência}$$

onde a eficiência é dada pela equação de regressão apresentada na eq. 4.14.

No caso de atributos, mede-se diretamente o percentual de defeituosos e, portanto, a *eficiência* = 1, ou seja, o tamanho da amostra equivalente é o mesmo tamanho da amostra efetiva.

Feitas essas considerações, retomando a apresentação do formulário, os limites de controle são calculados conforme segue:

- Limite de controle inferior (*LCI*)

$$eq. 4.16 \quad LCI = \bar{P}_{def} - 3 \times \sigma_p$$

- Linha central

$$eq. 4.17 \quad LC = \bar{P}_{def}$$

- Limite de controle superior (*LCS*)

$$eq. 4.18 \quad LCS = \bar{P}_{def} + 3 \times \sigma_p$$

Na Figura 4.4, apresenta-se um exemplo da carta de controle integrado da qualidade para o posto. Como pode ser observado, a amostra 20 indica a presença de uma causa especial e exige ação corretiva.

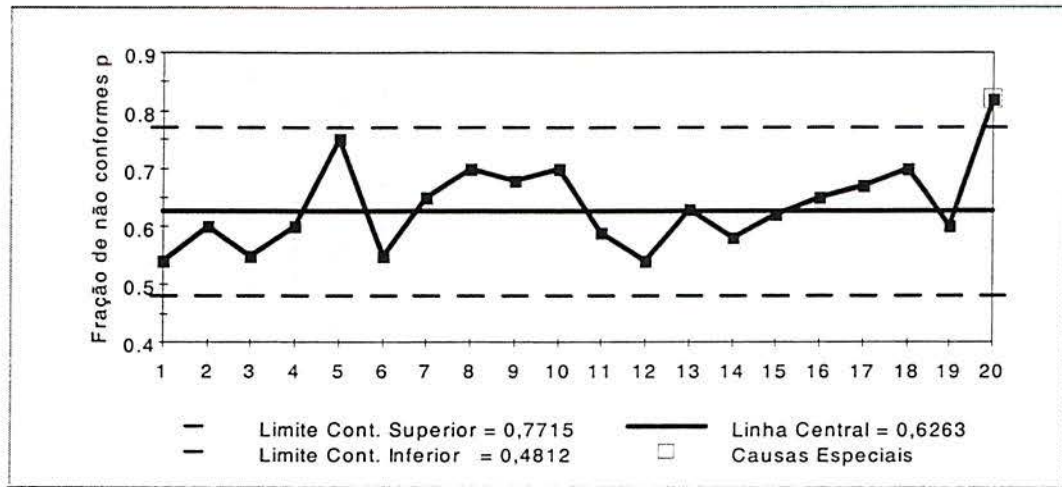


Figura 4.4 Exemplo da carta do controle integrado da qualidade (carta  $p$ ) do posto 4.

#### 4.1.2 Gráfico de Pareto por posto de controle

À medida que os subgrupos estão sendo coletados, simultaneamente ao monitoramento do percentual de defeituosos por posto, o banco de dados de qualidade vai acumulando os percentuais de defeituosos associados a cada variável e atributo. Assim, um valor médio para o percentual de defeituosos associado a cada característica de qualidade, avaliado para um intervalo qualquer de tempo, está disponível. Esse percentual médio pode ser analisado por um gráfico de Pareto por posto.

Sempre que aparecer um sinal fora do controle, ou seja, um percentual de defeituosos muito alto, o gráfico de Pareto por posto pode ser consultado para identificar, em ordem decrescente, as características de qualidade que estão influenciando mais fortemente para o posto de controle sair fora de seu padrão natural de operação. Assim, o operador do posto em questão pode dirigir seus esforços na direção certa, atacando inicialmente os problemas principais.

O gráfico de Pareto do posto é calculado conforme segue.

- Valor médio para o percentual de defeituosos associado com a característica de qualidade  $k$  ( $P_{\text{médio}_k}$ ), avaliado em um intervalo genérico de  $j = 1$  a  $J$  amostras:

$$\text{eq. 4.19} \quad P_{\text{médio}_k} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J P_{\text{def}_{k,j}}$$

A Figura 4.5 apresenta um exemplo do gráfico de Pareto que apresenta as características de qualidade em ordem decrescente do percentual médio de defeituosos.



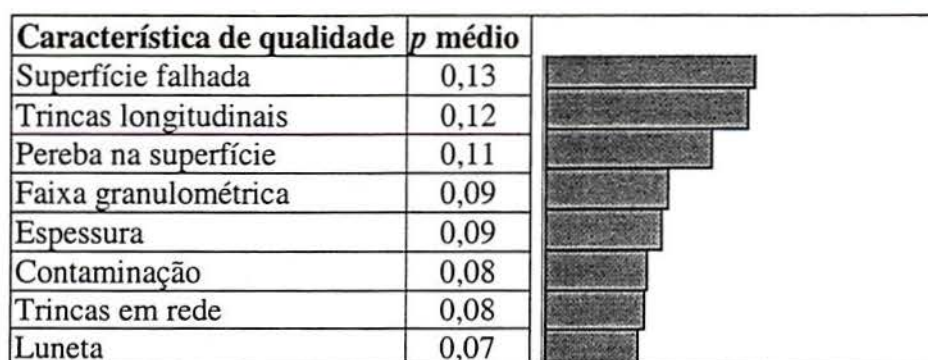


Figura 4.5 Exemplo do gráfico de Pareto do percentual médio de defeituosos associado a cada características de qualidade do posto 4.

### 4.1.3 Cartas de controle específicas para cada característica de qualidade $k$

Uma vez identificadas as características de qualidade que estão contribuindo mais fortemente para a queda de desempenho em um posto de controle, é possível consultar as cartas de controle individuais dessas variáveis e/ou atributos. Ou seja, as cartas de tendência central e variabilidade (por exemplo, carta  $\bar{X}$  e  $S$ ), no caso de variáveis, ou a carta do número de defeitos (carta  $c$ ), no caso de atributos.

A análise dessas cartas irá revelar se os problemas estão associados a causas comuns ou especiais, dirigindo a tomada de decisão e as ações correspondentes. Caso o problema esteja associado a causas especiais, é de responsabilidade do operador tomar uma ação corretiva sobre a causa localizada que está fazendo com que o processo saia fora do seu padrão natural de operação. A responsabilidade de atuar sobre as causas especiais é do operador, pois geralmente uma causa especial é fácil de identificar (causa localizada) e o seu efeito é grande sobre o processo, justificando-se economicamente a atuação no processo. Caso o problema esteja associado a causas comuns, é de responsabilidade da gerência atuar sobre o sistema para reduzi-las. A responsabilidade de reduzir as causas comuns de variabilidade é da gerência, pois elas estão associadas com variabilidade inerente ao processo, exigindo atuação sobre o sistema como um todo e nem sempre se justifica economicamente.

As orientações anteriores seguem a mesma lógica defendida pelo controle estatístico tradicional. O controle integrado da qualidade também não modifica as atividades de coleta de dados. O que propicia mudanças radicais na estratégia de controle é o fato de todos os dados irem para um único banco de dados de qualidade. A partir desse banco, o monitoramento pode ser feito usando cartas integradas, gráficos de Pareto e, quando

necessário, ou seja, seletivamente, cartas individuais. Além disso, a construção planejada do banco de dados permite a inclusão de filtros (os dados de qualidade podem vir acompanhados de informações referentes a turno, máquinas, operadores, origem de matérias-primas, ou qualquer outro item relevante), assegurando um amplo acesso a informações específicas, sempre que necessário.

A Figura 4.6 apresenta um exemplo de uma carta de controle para variáveis (carta de média), enquanto que a Figura 4.7 apresenta um exemplo de carta para atributos (carta de defeitos *c*).

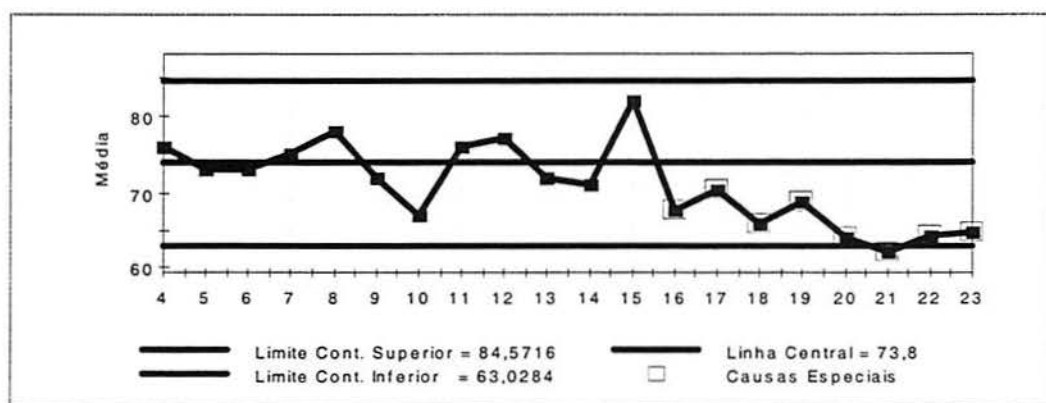


Figura 4.6 Exemplo da carta de controle de média para a característica de qualidade do tipo variável.

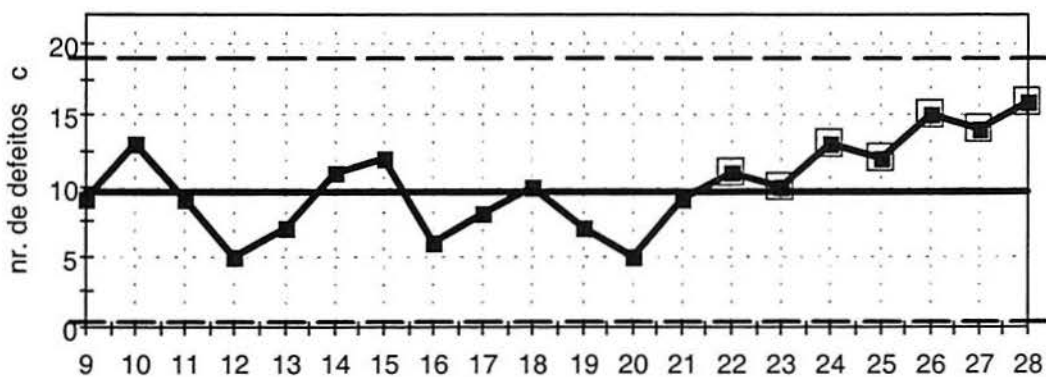


Figura 4.7 Exemplo da carta de controle de defeitos para a característica de qualidade do tipo atributo.

#### 4.1.4 Carta de controle integrada global

A carta de controle integrada global apresenta a soma do percentual de defeituosos gerados e estimados em todos os postos de controle. Dessa forma é possível acompanhar o

desempenho da linha usando uma única carta de controle integrada global que irá indicar quando a linha de produção (conjunto de diversos postos) sai fora do seu padrão natural de operação. Isso permite ao gerente da linha ter uma visão geral dos vários postos de controle. Ele enxerga o desempenho da linha, conforme avaliado em cada posto de controle. E as suas ações são guiadas pela carta integrada global. Enquanto não houver um sinal fora do controle, a prioridade é a produção.

A carta integrada global é calculada conforme segue.

- Percentual de defeituosos global para um subgrupo  $j$  ( $P_{global\ j}$ ):

$$eq. 4.20 \quad P_{global\ j} = 1 - \prod_{l=1}^L (1 - P_{defl,j})$$

onde:  $j$  refere-se aos subgrupo (amostras) que podem variar de  $1, \dots, J$ ;

$l$  refere-se às características de qualidade (variáveis ou atributos, de todos os postos), que podem variar de  $1, \dots, L$ .

A Figura 4.8 apresenta um exemplo da carta de controle integrada global.

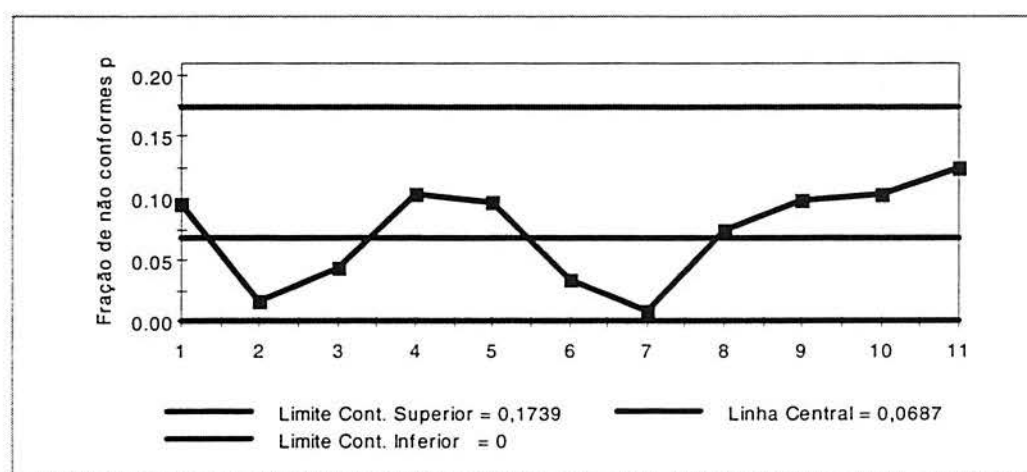


Figura 4.8 Exemplo da carta do controle integrada global.

### 4.1.5 Gráfico de Pareto global

À medida que os subgrupos estão sendo coletados, o banco de dados da qualidade vai acumulando os percentuais de defeituosos associados a todas as variáveis e atributos. Assim, o valor médio do percentual de defeituosos para cada características de qualidade, avaliado



sobre um intervalo de tempo qualquer, está disponível. Similarmente ao que foi feito em cada posto, os valores médios dos percentuais de defeituosos também podem ser analisados usando um gráfico de Pareto global, que contempla as características de qualidade que estão sendo monitoradas em todos os postos.

Sempre que a carta integrada global acusar uma amostra fora de controle, é recomendado consultar o gráfico de Pareto global que identifica, em ordem decrescente, as características de qualidade (e seus respectivos postos de controle) que estão contribuindo de forma mais acentuada para aumentar o percentual de defeituosos global. Dessa forma, o gerente da planta atua no local certo, pois tem acesso ao gráfico de Pareto de toda a linha de produção.

O formulário do gráfico de Pareto global é o mesmo utilizado nos postos, apenas utiliza-se o sub-índice  $l$  para lembrar que as características de qualidade são varridas ao longo de todos os postos de controle.

- Valor médio para o percentual de defeituosos associado com a característica de qualidade  $l$  ( $P_{médio_l}$ ), avaliado em um intervalo genérico de  $j = 1$  a  $J$  amostras:

$$eq. 4.21 \quad P_{médio_l} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J P_{def_{l,j}}$$

Enquanto que a carta de controle e o Pareto dos postos são utilizados principalmente pelos operadores responsáveis pelo processo, a carta de controle e o Pareto global são utilizados pelos gerentes da linha, possibilitando o acompanhamento e a ação sobre a qualidade da linha de produção como um todo.

Mesmo quando não há pontos fora do controle, semanalmente ou mensalmente, o gerente pode analisar o gráfico de Pareto global e identificar os pontos de melhoria. Nesse caso, ele pode fornecer subsídios aos grupos de melhoria da qualidade que, por sua vez, podem disparar ações que tenham impacto sobre as causas comuns de variabilidade. O resultado é a melhoria contínua do processo e um produto mais consistente e competitivo.

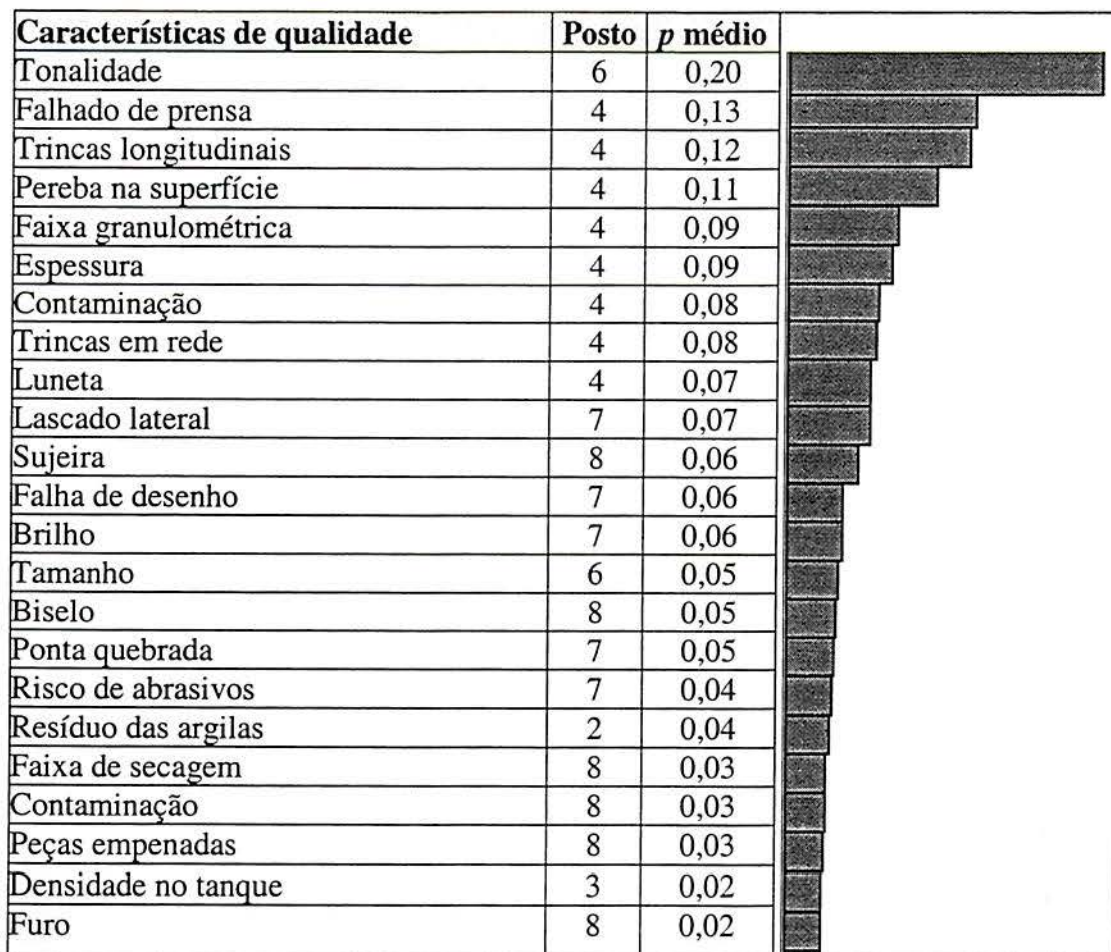


Figura 4.9 Exemplo do gráfico de Pareto global do percentual médio de defeituosos associado a cada características de qualidade.

#### 4.1.6 Carta de custos da má qualidade

O controle integrado da qualidade também incorpora uma carta de custos. Essa carta apresenta os custos da má qualidade observados para cada posto ou para a linha de produção global.

O valor plotado é o custo médio da má qualidade por peça. Ele é calculado levando em conta o percentual de defeituosos e o custo associado aos defeitos que geraram esse percentual.

Os custos dos defeitos podem ser estabelecidos da seguinte forma:

- a) se é um defeito que pode ser corrigido, deve ser considerado o custo do retrabalho;
- b) se é um defeito que não pode ser corrigido, devem ser consideradas as perdas de mão de obra, material e energia.

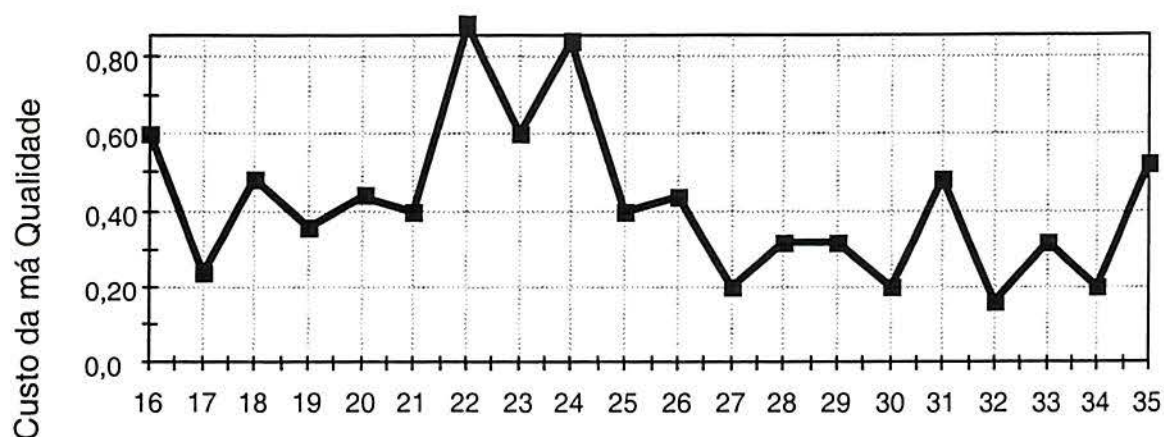


Figura 4.10 Carta de custos da má qualidade.

Os custos totais da má qualidade podem ser obtidos multiplicando-se o custo médio da má qualidade por peça, para um certo período, pelo respectivo volume de produção no período. Por exemplo, se em uma determinada linha de produção, ao longo de uma semana, o custo médio da má qualidade foi de R\$ 0,41 por peça e o volume produzido foi de 5.500 peças, o custo total da má qualidade no período foi de R\$ 2.255,00 ( $5.500 \times 0,41$ )

A carta de custos pode ser suavizada através da média móvel, possibilitando uma melhor avaliação da tendência geral dos custos da má qualidade, que podem estar estabilizados, crescendo ou diminuindo.

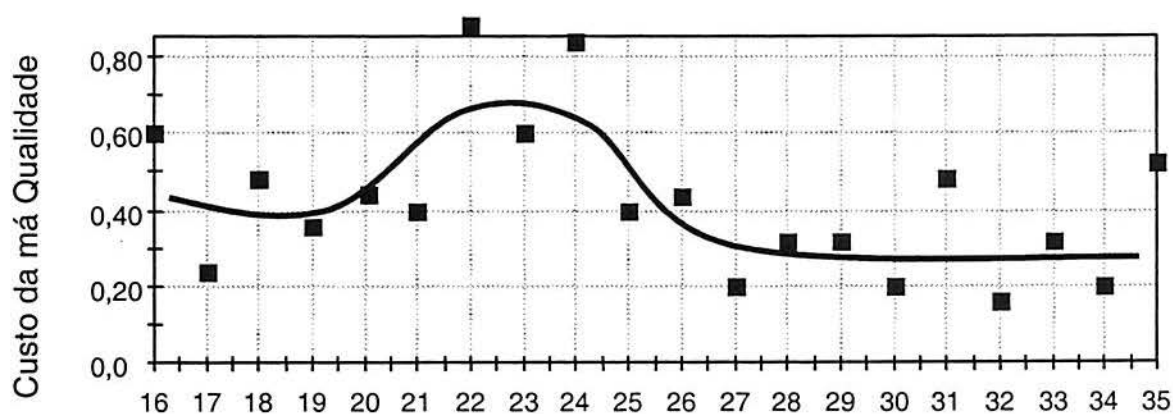


Figura 4.11 Carta de custos da má qualidade suavizada.



## **4.2 Implantação do controle integrado da qualidade**

A experiência prática da autora tem revelado que muitas vezes a implantação de programas de controle estatístico falham, não pela falta de conhecimento estatístico mas sim pela falta de uma abordagem sistemática para a sua implantação. Segundo Hradesky (1988), o sucesso da implantação do controle estatístico de processo depende 90% de ações gerenciais e somente 10% do conhecimento estatístico.

O foco principal desse item será a proposta de uma abordagem sistemática, baseada em uma série de etapas a serem cumpridas, para a implantação do controle integrado da qualidade.

De forma geral, a implantação do controle integrado da qualidade envolve as seguintes etapas:

- a) Definição do projeto;
- b) Planejamento da implantação do controle integrado da qualidade;
- c) Treinamento;
- d) Implantação efetiva;
- e) Acompanhamento e consolidação.

### **4.2.1 Definição do projeto**

#### **4.2.1.1 Definição do escopo e objetivos do projeto**

Nessa etapa são definidos: (a) escopo do projeto, (b) objetivos gerais e específicos, (c) resultados esperados a partir da implantação do controle integrado da qualidade, (d) custos estimados para a implantação, e (e) cronograma de implantação. Também são definidos os indicadores de desempenho a serem utilizados na avaliação dos resultados obtidos e metas a serem alcançadas a partir da implantação do controle integrado da qualidade.

#### **4.2.1.2 Definição da equipe de trabalho**

Primeiramente, é definida a equipe que implementará o controle integrado da qualidade. Essa equipe deve ser formada por gerentes, engenheiros, supervisores e

operadores que estejam envolvidos com os processos que serão posteriormente monitorados. A equipe deve conter um núcleo base que participará de todas as reuniões e decisões referentes ao projeto. Porém, conforme a necessidade, podem ser convidadas pessoas externas à equipe para auxiliarem em etapas específicas da implantação.

#### **4.2.1.3 Palestra de lançamento do projeto**

A operacionalização do controle integrado da qualidade é uma tarefa diária e continuada, envolvendo diversas pessoas na empresa por um período indeterminado de tempo. Assim, a equipe de projeto deve conscientizar a todos na empresa de que o sucesso do controle integrado da qualidade depende do comprometimento de todas as pessoas envolvidas.

Visando divulgar a extensão do controle integrado da qualidade, recomenda-se uma palestra de apresentação do projeto para todos os funcionários da empresa para apresentar uma visão geral sobre o controle integrado da qualidade, seus objetivos e cronograma de implantação. O objetivo dessa palestra é motivar e estimular o comprometimento das pessoas que de alguma forma estejam envolvidas com o projeto.

#### **4.2.2 Planejamento da implantação**

A coleta de dados para utilização em cartas de controle de processo exige investimentos em tempo e recursos. Os seguintes aspectos devem ser observados para uma boa utilização dessas cartas:

- a) não deve ser selecionado um número excessivo de variáveis e atributos, pois a coleta de dados pode se transformar no gargalo da produção;
- b) o controle deve ser aplicado sobre etapas dos processos importantes sob o ponto de vista das demandas de qualidade dos clientes;
- c) o controle deve estar associado a uma estratégia de ação, pois coletar dados e não agir quando necessário implica em desperdício de tempo e recursos.

Na fase de planejamento, é muito importante a participação das pessoas envolvidas com a linha de produção, para que elas se sintam co-responsáveis e tenham um bom comprometimento com a implantação do controle integrado da qualidade. Deve-se investir o maior tempo possível no planejamento, para minimizar a necessidade de alterações após a implantação, as quais poderiam desmotivar os operadores.



Nessa etapa, é necessário identificar quais as etapas dos processos críticas para a qualidade e apenas nesses processos implantar as cartas de controle. Além disso, a priorização das etapas dos processos deve seguir um método consistente, baseado em critérios objetivos, que permitam a correta identificação das etapas críticas dos processos sob o ponto de vista do cliente. Além disso, também é necessário definir, entre outros:

- a) Quais as características de qualidade que são importantes para o cliente ?
- b) Em quais processos essas características são construídas ?
- c) Quantos postos de controle são necessários?
- d) Qual a melhor localização dos postos de controle?
- e) Quais os atributos ou variáveis que devem ser controladas em cada posto de controle?
- f) Quais os critérios de classificação (filtros)?
- g) Qual a capacidade do sistema de medição?
- h) Quem são os responsáveis por agir quando o processo sai fora de controle?
- i) Que ação tomar quando o processo sai fora de controle?

Para auxiliar na definição dessas questões sugere-se as seguintes etapas descritas na sequência.

#### **4.2.2.1 Desdobramento da qualidade**

Na etapa de desdobramento da qualidade e na etapa posterior de desdobramento do processo, recomenda-se o uso do QFD - Desdobramento da Função Qualidade, que é uma ferramenta de planejamento capaz de associar as demandas do cliente com os processos de chão de fábrica. Ele propicia um meio sistemático para estruturar a informação e com isso priorizar os processos críticos para a qualidade demanda pelo cliente. Para maiores informações a respeito do QFD, ver por exemplo, King (1987), Akao (1990), Brown (1991) Eureka e Ryan (1993) ou Mizuno e Akao (1994).

Nessa etapa, é feito inicialmente o levantamento da demanda de qualidade (voz do cliente) através de pesquisa de mercado (ver Figura 4.12) e, logo após, a priorização dos itens da demanda de qualidade através do estabelecimento de um peso de importância relativo ( $W_i$ ) para cada um dos itens. Em seguida, são listadas as características de qualidade, que são aspectos mensuráveis da demanda de qualidade. Então, a demanda de qualidade é cruzada com as características de qualidade usando-se a matriz da qualidade que é apresentada da seguinte forma:



a) a qualidade demandada aparece no cabeçalho das linhas, ou seja, no lado esquerdo da matriz;

b) as características de qualidade aparecem no cabeçalho das colunas, ou seja, no topo da matriz.

O preenchimento da matriz de qualidade é realizado com base na opinião da equipe técnica que deve ser questionada com respeito à intensidade das relações entre as características de qualidade e os itens da qualidade demandada. Para isso, sugere-se o uso da seguinte escala:

Tabela 4.1 Escala da intensidade das relações.

Peso	Relação
9	Muito importante
6	Moderada
1	Pouco importante

As relações atribuídas pela equipe técnica são assinaladas no interior da matriz (ver Figura 4.13). O uso da matriz da qualidade permite identificar quais características de qualidade contribuem para o atendimento dos itens da qualidade demandada. A priorização das características de qualidade é apresentada na última linha da matriz da qualidade.

Uma característica de qualidade é considerada prioritária se: (a) atende a vários itens da qualidade demandada e/ou (b) atende a itens da qualidade demandada que são muito importantes e/ou (c) mantém relações fortes com os itens de qualidade demandada.

Para o cálculo da priorização das características de qualidade, sugere-se um índice de importância ( $ICQ_i$ ), calculado como o somatório do produto do peso relativo dos itens da qualidade demandada ( $W_i$ ) pela intensidade das relações atribuídas no interior da matriz ( $R_{ij}$ ). Esse índice considera que a falha em uma característica de qualidade compromete integralmente um item da qualidade demandada pelo cliente.

O formulário correspondente é o seguinte:

$$eq. 4.22 \quad ICQ_j = \sum_{i=1}^D (W_i \times R_{ij})$$

onde:  $ICQ_j$  índice da característica de qualidade do produto  $j$ ;

$W_i$  peso atribuído ao item de qualidade demandada  $i$ ;

$R_{ij}$  intensidade do relacionamento entre a qualidade demandada  $i$  e a característica de qualidade do produto  $j$ ;

$D$  número total de itens de qualidade demandada.

Essa priorização permite quantificar e identificar com objetividade as características de qualidade críticas, ou seja, aquelas que estão fortemente relacionadas com a satisfação do cliente. Um exemplo mais detalhado de desdobramento da qualidade é apresentado em Ribeiro e Echeveste (1996).

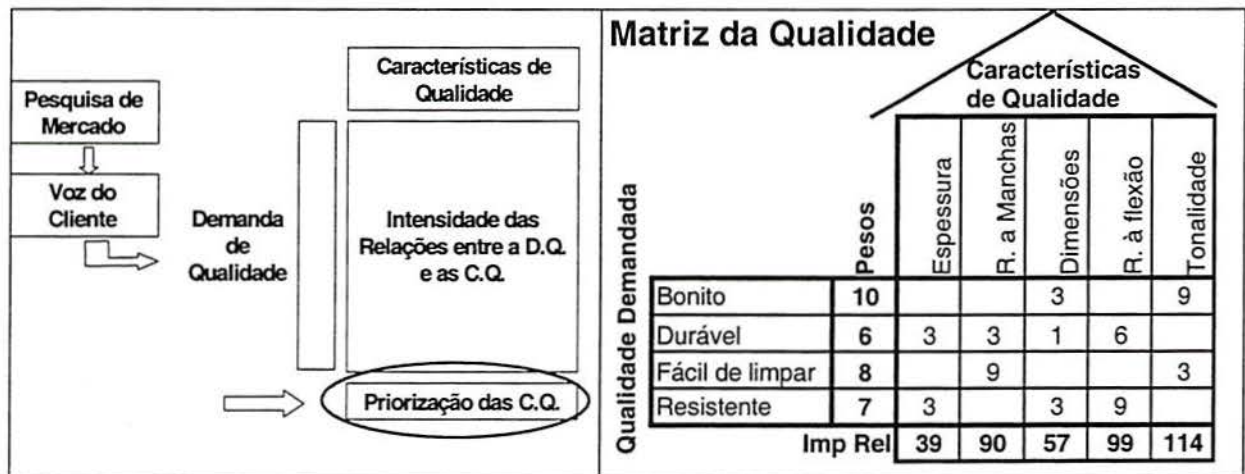


Figura 4.12 Desdobramento da qualidade.

Figura 4.13 Exemplo de desdobramento da qualidade.

#### 4.2.2.2 Desdobramento dos processos

Concluída a matriz da qualidade, o próximo passo é o desdobramento dos processos, que permitirá associar as características de qualidade do produto final com os parâmetros de processo ou características de qualidade avaliadas durante o processo de manufatura. O desdobramento dos processos trará como resultado a identificação dos parâmetros de processo e características de qualidade críticos para a qualidade.

Inicialmente, é necessário entender o macro-fluxo dos processos da empresa e então listar todos os processos de manufatura na ordem em que aparecem na linha de produção (ver Figura 4.14). Então, é possível listar os parâmetros de processo e as características de qualidade avaliadas em cada processo e cruzá-los com as características de qualidade do produto final. Isso é feito usando a matriz de processos que é apresentada da seguinte maneira:



a) o cabeçalho da matriz, ou seja, o topo da matriz, é preenchido com as características de qualidade do produto final;

b) o cabeçalho das linhas, ou seja, o lado esquerdo da matriz é preenchido com a lista de todos os parâmetros e características (daqui em diante muitas vezes chamados simplesmente de parâmetros de processo) que podem ser avaliados durante a manufatura.

Para cada característica de qualidade do produto, é preciso identificar quais os parâmetros e características de processo que são responsáveis por sua obtenção, ou seja, quais os parâmetros e características que devem ser monitorados a fim de garantir a obtenção daquela característica de qualidade do produto em particular.

O preenchimento da matriz é realizado com base na opinião da equipe técnica, a qual é questionada com respeito à intensidade das relações ( $R_{ij}$ ) entre os parâmetros e características de processo e as características de qualidade do produto final, sendo utilizada a mesma escala da Tabela 4.1. As relações atribuídas pela equipe técnica são assinaladas no interior da matriz. A priorização dos parâmetros e características do processo é apresentada na última coluna da matriz de processos.

A avaliação da importância para a qualidade de cada parâmetro e característica de qualidade do processo é realizada levando-se em conta as relações estabelecidas no interior da matriz e também o índice das características de qualidade ( $ICQ_j$ ).

Assim, um parâmetro e característica de qualidade do processo é considerado prioritário se: (a) atende a várias características de qualidade do produto e/ou (b) atende a características de qualidade do produto que são muito importantes e/ou (c) mantém relações fortes com as características de qualidade do produto.

Para a definição da importância para a qualidade de cada parâmetro e característica de qualidade do processo, foi estabelecido um índice de qualidade ( $IQP_i$ ), calculado como o somatório do produto do índice das características de qualidade do produto ( $ICQ_j$ ) pela intensidade das relações atribuídas no interior da matriz ( $R_{ij}$ ). Esse índice considera que desvios em um parâmetro do processo comprometem uma ou mais características de qualidade do produto final.

O formulário correspondente é o seguinte:

$$eq. 4.23 \quad IQP_i = \sum_{j=1}^P (ICQ_j \times R_{ij})$$

onde:  $IQP_i$  índice de qualidade para cada parâmetro ou característica de qualidade do processo produtivo  $i$ ;



$ICQ_j$  índice da característica de qualidade do produto  $j$ ;

$R_{ij}$  intensidade do relacionamento entre o parâmetro ou característica de qualidade do processo  $i$  e a característica de qualidade do produto  $j$ ;

$P$  número total de característica de qualidade do produto.

O uso da matriz de processos permite identificar quais as etapas dos processos são mais importantes para a qualidade.

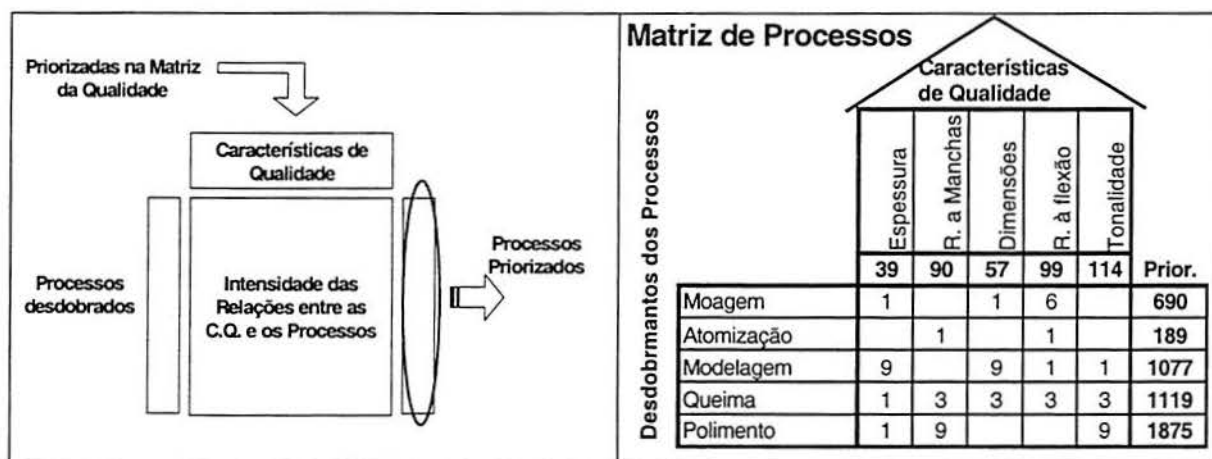


Figura 4.14 Desdobramento dos processos.

Figura 4.15 Exemplo do desdobramento dos processos.

Após a identificação dos parâmetros e características de qualidade do processo críticos para a qualidade, é necessário ainda verificar qual a capacidade e o conhecimento referente a esses parâmetros e características, a fim de priorizar as ações de melhoria nos processos e características que sejam importantes para a qualidade e que atualmente não estejam cumprindo bem sua função.

Então, questiona-se junto à equipe técnica qual a capacidade de cada parâmetro e característica do processo, estimada a partir do percentual de observações fora de especificação, conforme a escala que aparece na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Escala de capacidade das etapas dos processo produtivos.

Escala do $C_{pk}$	Capacidade ( $C_{pk}$ )	Percentual de peças fora de especificação
0,33	Muito pouco capaz	$\cong 32,00 \%$
0,67	Pouco capaz	$\cong 4,4 \%$
1,0	Capaz	$\cong 0,27 \%$
1,33	Muito capaz	$\cong 0,0064 \%$
1,67	Extremamente capaz	$\cong 0,0000 \%$

Na sequência, questiona-se o conhecimento da equipe técnica a respeito do processo, ou seja, se a equipe conhece o ajuste ótimo dos parâmetros e características de qualidade do processo e o efeito desses parâmetros sobre as diversas características de qualidade do produto final. Isso pode ser feito usando a escala que aparece na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Escala de conhecimento das etapas dos processo produtivos.

Escala do $C$	Conhecimento ( $C$ )
0,2	Muito pouco conhecimento
0,4	Pouco conhecimento
0,6	Moderado conhecimento
0,8	Bastante conhecimento
1,0	Total conhecimento

Com isso, pode ser criado um índice de priorização ( $IPP_i$ ) que considera tanto o índice de importância dos parâmetros e características de qualidade do processo em questão como a sua capacidade e o conhecimento a seu respeito.

O formulário correspondente é o seguinte:

$$eq. 4.24 \quad IPP_i = \frac{IQP_i}{C_{pki} \times C_i}$$

onde:  $IPP_i$  índice de priorização para cada parâmetro e característica de qualidade do processo  $i$ ;

$IQP_i$  índice de qualidade para cada parâmetro e característica de qualidade do processo  $i$ ;

$C_{pki}$  valor de capacidade para cada parâmetro e característica de qualidade do processo  $i$ ;

$C_i$  valor de conhecimento para cada parâmetro e característica de qualidade do processo  $i$ .

As etapas dos processos priorizadas são aquelas que apresentam: (a) alta importância para a qualidade e/ou (b) baixa capacidade e/ou (c) baixo conhecimento técnico.

Um exemplo mais detalhado de desdobramento de processos é apresentado em Ribeiro e Caten (1996a) e Ribeiro, Caten e Leitão (1997).

#### 4.2.2.3 Direcionamento das ações

Uma vez identificados os parâmetros e características de qualidade do processo críticos para a qualidade, eles podem ser analisados individualmente quanto às possíveis ações de melhoria a serem realizadas. Questiona-se junto à equipe técnica quais as ações pertinentes para a melhoria da capacidade de cada parâmetro e característica. Muitas vezes, a ação indicada será o controle estatístico (no caso o controle integrado da qualidade). Mas também podem ser indicadas outras ações, específicas para certos cenários, como por exemplo: a) treinamento, b) desenvolvimento de fornecedor, c) projeto de experimentos, d) estudos ergonômicos, e) aquisição de equipamentos, f) definição de procedimentos, g) definição de especificações, h) análise do sistema de medição e i) auditoria.

Uma vez listadas as possíveis ações corretivas, a equipe deve ser questionada quanto à aplicação dessas ações corretivas nos parâmetros e características priorizados. Essa análise pode ser realizada conforme a escala que aparece na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Escala da intensidade da aplicação das ações corretivas.

Escala	Aplicação
1	Muito fraca
2	Fraca
3	Moderada
4	Forte
5	Muito forte

O preenchimento da matriz documenta as ações apropriadas para cada parâmetro e característica do processo. Além disso, resultam identificados os parâmetros e características que devem fazer parte do controle integrado.





Figura 4.16 Ações possíveis para os processos críticos.

Figura 4.17 Exemplo da matriz de ações possíveis.

Um exemplo mais detalhado da matriz de ações é apresentado em Ribeiro e Caten (1996b), Ribeiro, Caten, Fritsch e Leitão (1997) e Ribeiro, Leitão, Echeveste e Caten (1997).

#### 4.2.2.4 Identificação dos postos de controle e parâmetros e características de qualidade do processo a serem monitoradas em cada posto

Os postos de controle são os locais físicos onde serão monitorados os diversos parâmetros e características de qualidade dos processo críticos, que podem ser atributos ou variáveis. Nas empresas divididas em células de manufatura, os postos de controle podem ser as próprias células. Enquanto isso, uma linha de produção tradicional pode ser dividida nos seus macro processos, fornecendo uma primeira idéia da posição dos postos de controle.

De forma mais específica, conhecendo-se as características críticas para a qualidade segundo a demanda dos clientes e onde elas são construídas, ou seja, a etapa do processo produtivo, fica fácil definir a localização dos postos de controle (ver Figura 4.18) e os parâmetros e características de qualidade do processo a serem monitoradas em cada posto.

Os postos de controle em geral devem estar próximos do local onde são avaliados os parâmetros e as características de qualidade do processo. Além disso, eles devem concentrar instrumentos de medição, pessoal capacitado para as medições e facilidades computacionais para o registro dos dados.

Um exemplo mais detalhado da identificação dos postos de controle e definição das características de qualidade monitoradas em cada posto é apresentado em Ribeiro e Caten (1996b).

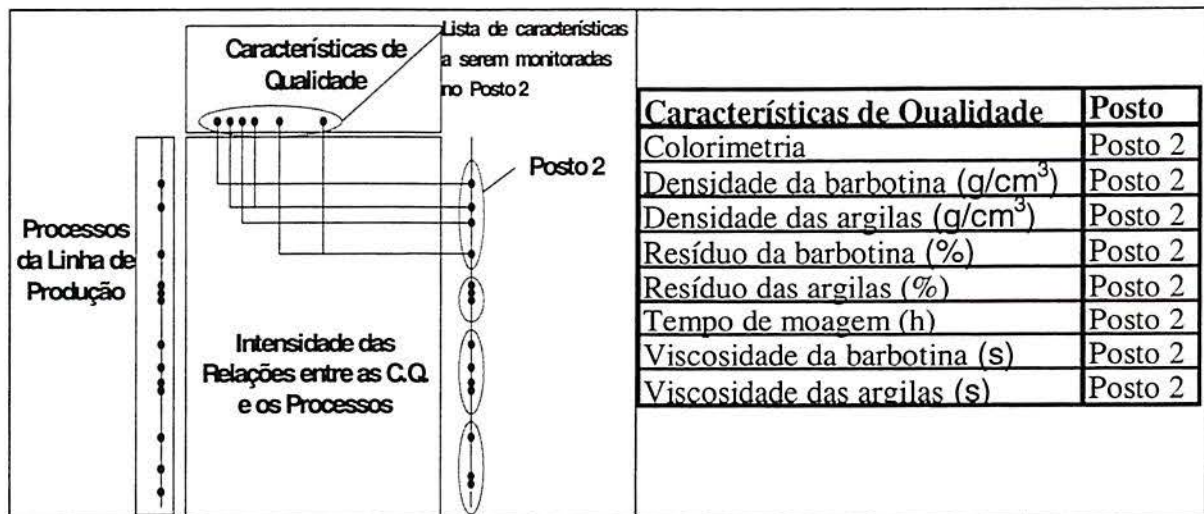


Figura 4.18 Identificação dos postos e alocação das C.Q. em cada posto.

Figura 4.19 Exemplo de características de qualidade alocadas no posto 2.

Na Figura 4.20, é apresentado um desenho esquemático com as primeiras quatro etapas do planejamento da implantação do controle integrado da qualidade.

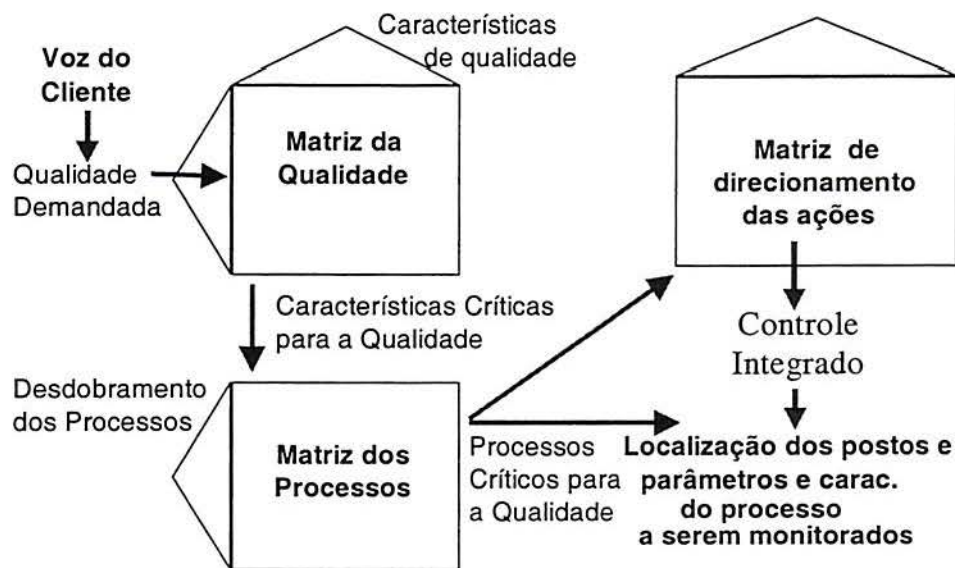


Figura 4.20 Desenho esquemático das primeiras quatro etapas do planejamento da implantação de controle integrado da qualidade.

Resumindo, as primeiras quatro etapas são: (a) desdobramento da qualidade, composta pela identificação da qualidade demandada, desdobramento das características de qualidade do produto, construção da matriz da qualidade e priorização das características de qualidade do produto; (b) desdobramento dos processos, composto pela identificação dos parâmetros e características do processo, construção da matriz de processos e priorização dos



parâmetros e características do processo críticos para a qualidade; (c) direcionamento das possíveis ações corretivas; (d) localização dos postos de controle e alocação dos parâmetros e características do processo em cada posto.

#### **4.2.2.5 Definição de critérios de classificação dos produtos (filtros)**

Nessa etapa, é importante definir critérios de classificação (também denominados filtros) que serão utilizados posteriormente na análise gerencial das cartas de controle do controle integrado da qualidade. Os critérios de classificação são informações como tipo de produto, dimensões do produto, turno, máquina, operador, fornecedor, matérias-prima, etc... que são registradas juntamente com os dados de qualidade. Posteriormente, os dados da qualidade podem ser agrupados segundo esses critérios para análise gerencial; em outras palavras, dados da qualidade podem ser “filtrados” relativamente a critérios de classificação.

Dessa forma, será possível, por exemplo, saber a condição de qualidade de todos os produtos do tipo “decorado” independente das dimensões ou a condição de qualidade dos produtos 30x30 cm<sup>2</sup> independente do tipo de produto.

Os critérios de classificação podem ser de cinco tipos: somente filtro, controle em paralelo, especificações, custos, especificações e custos.

Os critérios de classificação do tipo somente filtro simplesmente classificam o produto para que posteriormente seja possível realizar uma análise da qualidade agrupando por esses critérios de classificação.

Os critérios de classificação do tipo controle em paralelo, além de classificarem os produtos, também alteram o volume de produção que se divide pelo número de máquinas do posto de controle.

Os critérios de classificação do tipo especificações, além de classificarem os produtos, também alteram as especificações dos parâmetros e características do processo.

Os critérios de classificação do tipo custos, além de classificarem os produtos, também alteram os custos dos parâmetros e características do processo.

Os critérios de classificação do tipo especificações e custos, além de classificarem os produtos, também alteram simultaneamente as especificações e os custos dos parâmetros e características do processo.



#### 4.2.2.6 Descrição dos parâmetros e características de qualidade do processo

Uma vez definidos os postos de controle e os parâmetros e características de qualidade do processo a serem monitorados em cada posto, segue-se para um detalhamento maior desses parâmetros e características de qualidade do processo.

Nessa etapa, é necessário definir se o parâmetro ou característica do processo é uma variável ou um atributo.

Variáveis são medições realizadas com um sistema de medição, logo podem assumir qualquer valor dentro de um intervalo qualquer.

Atributos são avaliações realizadas comparando-se o parâmetro ou a característica de qualidade do processo com um padrão, podendo ser classificado conforme ou não-conforme o padrão. Logo, os atributos só podem assumir valores inteiros.

Outra questão é definir se os itens monitorados são parâmetros de processo, variáveis e atributos que qualificam o processo e não estão diretamente ligadas à qualidade do produto final ou se são características de qualidade, variáveis e atributos que configuram diretamente a qualidade do produto final.

As cartas integradas para os postos de controle são geradas separadamente; no geral, cada posto possui uma carta integrada para parâmetros dos processos e uma carta integrada para características de qualidade.

Parâmetros de processo fora de especificação indicam uma maior probabilidade de produção de defeituosos (e devem gerar ações corretivas); enquanto que características de qualidade fora da especificação representam diretamente a ocorrência de defeituosos (e também devem gerar ações corretivas).

Para cada variável (ou atributo) que será monitorada, é necessário definir o tipo (nominal, maior ou menor-é-melhor), unidade de medição, valor alvo e especificações para os estudos de capacidade.

Variáveis do tipo nominal-é-melhor possuem um valor alvo e qualquer desvio desse valor alvo provoca uma perda de qualidade. Logo, é necessário definir um limite inferior e superior de especificação, além dos quais a variável é considerada não-conforme.

Variáveis do tipo maior-é-melhor são aquelas cujo valor alvo é teoricamente o infinito, logo não possuem limite superior de especificação. É necessário definir apenas um limite inferior de especificação, abaixo do qual a variável é considerada não-conforme.

Variáveis do tipo menor-é-melhor são aquelas cujo valor alvo é teoricamente o zero, logo não possuem limite inferior de especificação. É necessário definir apenas um limite superior de especificação, acima do qual a variável é considerada não-conforme.

Na sequência, são estimados custos da má qualidade associados às variáveis e atributos monitorados no controle integrado da qualidade. A má qualidade das variáveis e atributos podem resultar em: retrabalho, reclassificação ou refugo do material. Estima-se uma proporção do custo total de manufatura que represente o prejuízo incorrido pela não-conformidade de cada variável ou atributo. Por exemplo, uma variável classificada como refugo (ou seja, medições não-conformes daquela variável implicam em descarte do material em processamento) apresenta uma proporção dada por  $(x/y) \times 100$ , onde  $x$  representa o custo de manufatura acumulado até o processo ou operação onde a variável é monitorada e  $y$  representa o custo total de manufatura.

A partir da estimativa do percentual de defeituosos e dos custos para todas as variáveis e atributos monitorados no controle integrado da qualidade, é possível estimar os custos da má qualidade para cada tipo de produto, para cada posto de controle ou para a linha de produção global.

#### **4.2.2.7 Definição do procedimento de coleta de dados**

Nessa etapa é necessário definir: (a) o tipo de carta de controle; (b) o tamanho da amostra; (c) a frequência de amostragem; (d) a forma de registro dos dados (registro eletrônico em computador ou em planilha de papel) e (e) o sistema de medição.

#### **4.2.2.8 Avaliação do sistema de medição**

Uma vez definido o sistema de medição, é necessário avaliar a sua capacidade. Um sistema de medição capaz apresenta uma variância de medição inferior a 20% da amplitude das especificações. Quando houver suspeita a respeito da capacidade de um sistema de medição, ele deve ser analisado através de estudos de Repetibilidade e Reprodutibilidade. Caso os estudos revelem a insuficiência do sistema de medição, planeja-se melhorias no equipamento, revisão de procedimentos ou treinamento dos operadores. A avaliação do sistema de medição é etapa importante na implantação do controle integrado da qualidade, pois define a confiabilidade dos dados a serem utilizados no controle integrado.



#### **4.2.2.9 Definição de responsabilidades**

Nessa etapa é necessário definir os responsáveis pela coleta dos dados e registro na planilha, digitação dos dados (no caso de uso do computador), monitoramento das cartas integradas, monitoramento da carta de custos, monitoramento eventual das cartas individuais, cálculo dos limites de controle e estudos de capacidade.

Também é necessário definir quem é o responsável por disparar e executar ações corretivas no caso do processo sair fora do controle e ações preventivas para evitar a reincidência do problema. Além disso, é recomendado criar um grupo de apoio à qualidade (GAQ) que deve ser chamado caso a causa especial não possa ser corrigida pelo operador e supervisor.

#### **4.2.2.10 Definição da documentação necessária**

Nesta etapa, são elaboradas as planilhas de coleta de dados a serem utilizadas em cada posto de controle e as planilhas de registro de ocorrência de causas especiais. As planilhas de coleta de dados devem conter todas as variáveis e atributos monitorados em cada posto de trabalho e informações sobre os critérios de classificação dos dados coletados. Informações referentes a critérios de classificação são específicas para cada posto de controle (é possível que alguns critérios de classificação não se apliquem a todos os postos de controle). Nas planilhas de registro de ocorrência de causas especiais, são registrados: (a) a data e hora de ocorrência da anomalia; (b) sua provável origem (matéria-prima, mão-de-obra, máquinas, etc.); (c) a ação tomada para a solução do problema e seu responsável e (d) o tempo observado de parada da produção.

Hradesky (1988) sugere o desenvolvimento de uma matriz onde possíveis ações a serem tomadas na presença de causas especiais são apresentadas. Tal matriz deve ser continuamente atualizada de forma a refletir as anomalias que incidem com maior frequência nos processos. O objetivo dessa matriz é agilizar a identificação da origem do problema causador da anomalia e sua solução por parte do operador.

O monitoramento da qualidade através do controle integrado da qualidade deve estar associado a uma estratégia de ação, com procedimentos e responsáveis bem definidos. Coletar dados e não agir em resposta às causas especiais implica desperdício de tempo e recursos. Antes do início da implantação do controle integrado da qualidade, recomenda-se agir sobre os processos com vistas a eliminar causas externas de variabilidade de incidência



corriqueira. Ao controle integrado da qualidade, cabe a tarefa de identificação de causas especiais não evidentes.

### **4.2.3 Treinamento em controle integrado da qualidade**

O treinamento é uma etapa essencial, pois o corpo técnico da empresa deve ser capaz de interpretar os dados coletados. O treinamento deverá ser realizado imediatamente antes da implantação efetiva e pode ser ministrado com diferentes níveis de detalhamento, atendendo às diferentes funções na empresa.

Por exemplo, para gerentes e diretores é suficiente ministrar os conteúdos referentes à análise dos dados, pois eles necessitam predominantemente de subsídios para tomar decisões baseados nos dados coletados. Supervisores e engenheiros, por outro lado, devem receber um treinamento integral em CEP pois a esses profissionais caberá a tarefa de definir tamanhos de amostra, frequência de amostragem, limites de controle, etc.. Operadores, por fim, devem ser treinados no preenchimento de planilhas e na análise das cartas de controle resultantes, com o objetivo de detectar a presença de causas especiais.

O treinamento para gerentes e diretores compreende: a) estudos de estabilidade e b) estudos de capacidade.

O treinamento completo para engenheiros e supervisores compreende: a) introdução ao controle estatístico do processo, b) cartas de controle para variáveis, c) cartas de controle para atributos, d) estudos de estabilidade, e) estudos de capacidade e f) estudos do sistema de medição.

O treinamento para operadores compreende: a) preenchimento de planilha, b) digitação de dados no *software* (carta de controle no *software*), c) preenchimento das cartas de controle (caso elas sejam operacionalizadas em papel) e d) análise das cartas de controle.

### **4.2.4 Implantação efetiva**

A implantação efetiva compreende, de forma geral, as etapas que seguem.

#### **4.2.4.1 Início do monitoramento**

Nessa etapa, é necessário definir a data de início da coleta de dados a serem utilizados no controle integrado da qualidade. Também tem início a utilização prática do

*software* dedicado ao controle integrado da qualidade, sendo definida a frequência ideal de entrada de dados registrados nas planilhas no computador.

Primeiramente, os dados começam a ser coletados e plotados no gráfico, mas os limites de controle do processo ainda não são conhecidos.

#### **4.2.4.2 Cálculo dos limites de controle**

Na etapa de cálculo dos limites de controle, estes limites são calculados e acrescentados às cartas de controle. O cálculo dos limites das cartas individuais demanda uma quantidade de dados coletados, o que pode levar alguns dias, conforme a frequência de amostragem adotada para as variáveis e atributos monitorados no controle integrado da qualidade. Uma vez calculados os limites, no caso de aparecimento de causas especiais, esses devem ser recalculados, após identificação e eliminação das causas de anomalia no processo. Limites de controle obtidos de dados representativos de um processo sob controle estatístico (associados apenas às causas comuns de variabilidade) são utilizados no monitoramento futuro dos processos.

O cálculo dos limites de controle das cartas integradas para os postos só pode ser efetuado após terem sido coletados dados referentes a todas as variáveis e atributos do posto de controle em questão, o que pode levar algumas semanas.

#### **4.2.5 Acompanhamento e consolidação**

O acompanhamento e consolidação do controle integrado da qualidade compreende as etapas apresentadas a seguir:

(a) análise da estabilidade dos processos: analisa-se a estabilidade dos processos e, caso seja necessário, adotam-se procedimentos de identificação e eliminação de causas especiais;

(b) análise da capacidade dos processos: analisa-se a capacidade dos processos e, caso seja necessário, implementam-se estudos de otimização de processos, através da ação de grupos de melhoria da qualidade ou do uso de ferramentas específicas, como o projeto estatístico de experimentos;

(c) avaliação da sistemática de ação: analisa-se o sistema implantado, verificando a eficiência dos procedimentos de coleta de dados, registro e ação. Identificam-se eventuais deficiências e planeja-se o aprimoramento do sistema. A análise do sistema deve ser feita em



conjunto com as pessoas envolvidas na implantação do controle integrado da qualidade (gerentes, engenheiros, supervisores e operadores).

Na etapa de acompanhamento e consolidação, avaliam-se os resultados da implantação do controle integrado da qualidade através do indicador de desempenho selecionado para monitorar melhorias advindas da implantação.

Recomenda-se que periodicamente seja realizada uma auditoria no controle integrado. As auditorias têm por objetivo verificar a adequação das planilhas para coleta de dados, o cumprimento do esquema de amostragem selecionado para cada variável ou atributo (isto é, tamanho da amostra e frequência de amostragem), a acurácia na coleta de dados, a atualização dos limites de controle e a eficiência das ações corretivas adotadas quando da incidência de causas especiais nos processos, entre outros aspectos.

### **4.3 Notas sobre o controle integrado da qualidade**

Algumas situações de descontrole não são detectadas pelo controle integrado. Por exemplo, se a média de uma variável individual desvia-se do alvo, mas é compensada por uma redução no desvio-padrão, não gerando um aumento no percentual de defeituosos, isso não é detectado no controle integrado. Similarmente, se várias variáveis estão melhorando, enquanto uma variável específica sai fora do controle, isso também pode passar despercebido nas cartas integradas.

Para tornar o controle mais eficiente, o aplicativo computacional deverá ser aprimorado de modo a contemplar uma varredura das cartas individuais, identificando corridas e pontos fora do controle e apresentando um sumário em uma janela específica.

O controle integrado da qualidade deve ser aplicado em um cenário onde existe um grande número de operações sendo executadas por máquinas e operadores diferentes, caracterizando a independência estatística entre as variáveis e atributos associados com as diferentes operações. O controle integrado da qualidade não considera a estrutura de correlação que pode existir entre as características. Se as correlações forem significativas, o uso do controle integrado da qualidade é desaconselhado, e técnicas multivariadas devem ser preferidas.

O uso do controle integrado da qualidade e do controle multivariado não competem entre si, mas devem ser utilizados em situações muito distintas. O controle multivariado é recomendado em situações onde existe um processo crítico monitorado através de algumas



variáveis (por exemplo, 3 a 10 variáveis). Assim, um reator nuclear poderia ser monitorado através de 6 variáveis principais, correlacionadas entre si, pois são resultado de um mesmo fenômeno físico-químico.

O controle integrado, por outro lado, deve ser aplicado em plantas de manufatura onde podem existir 200 ou 300 variáveis a serem monitoradas, as quais provêm dos mais variados setores (desde a recepção de matéria-prima até a expedição final, passando por inúmeros macro-processos e todas as operações que eles contemplam). Nesse cenário, o uso generalizado da estratégia multivariada seria impossível (exigiria o monitoramento de  $200 \times 200 = 40.000$  correlações).

Naturalmente, fica aberta a possibilidade do uso complementar do controle integrado da qualidade e do controle multivariado. Ou seja, uma planta de manufatura poderia ser gerenciada pelo controle integrado da qualidade e uns poucos processos críticos poderiam ser monitorados também por cartas multivariadas.

## **5 ESTUDO DE CASO: IMPLANTAÇÃO DO CONTROLE INTEGRADO DA QUALIDADE EM UMA EMPRESA DE REVESTIMENTO CERÂMICO**

A proposta deste estudo de caso é validar a metodologia do controle integrado da qualidade (CIQ) em uma empresa de revestimentos cerâmicos.

A implantação do controle integrado da qualidade envolveu as etapas previstas no capítulo 4, ou seja:

- a) definição do projeto;
- b) planejamento da implantação do controle integrado da qualidade;
- c) treinamento;
- d) implantação efetiva;
- e) acompanhamento e consolidação.

A estrutura deste capítulo foi concebida da seguinte forma: a etapa de definição do projeto é apresentada na seção 5.1; a etapa de planejamento da implantação é detalhada na seção 5.2; a etapa de treinamento é apresentada na seção 5.3; a etapa de implantação efetiva é apresentada na seção 5.4; a etapa de acompanhamento e consolidação é discutida na seção 5.5 e, finalmente, a seção 5.6 traz algumas considerações finais.

### **5.1 Definição do projeto**

A definição do projeto compreendeu as seguintes etapas:

### 5.1.1 Definição do escopo e objetivos do projeto

Definiu-se como escopo do estudo uma unidade fabril de uma empresa de revestimento cerâmico. Os objetivos da aplicação do CIQ, estabelecidos pela gerência da empresa, foram: (a) melhorar os níveis de qualidade praticados pela empresa e (b) reduzir os custos da má qualidade.

Ao final do projeto de implantação, os principais benefícios esperados são:

- a) redução dos índices de refugo e retrabalho e aumento da produtividade;
- b) maior envolvimento e comprometimento dos operadores com a qualidade do processo, liberando a gerência para as tarefas de melhoria;
- c) priorização e alocação ótima dos recursos voltados às atividades de melhoria dos processos;
- d) otimização dos processos, aumentando os índices de capacidade;
- e) redução dos custos da má qualidade;
- f) melhor imagem junto aos clientes da empresa.

O prazo de implantação foi definido em seis meses, com reuniões quinzenais de acompanhamento. O cronograma de implantação é apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Cronograma de implantação do CIQ na empresa cerâmica.

Etapas do Projeto	1 <sup>o</sup> mês	2 <sup>o</sup> mês	3 <sup>o</sup> mês	4 <sup>o</sup> mês	5 <sup>o</sup> mês	6 <sup>o</sup> mês
Definição do projeto	X					
Planejamento da implantação	X	X				
Desenvolvimento do <i>software</i> do CIQ		X	X			
Treinamento		X	X			
Implantação do controle integrado			X	X	X	
Acompanhamento e consolidação					X	X
Relatórios						X

### 5.1.2 Definição da equipe de trabalho

Primeiramente, foi definida a equipe responsável pela implantação do controle integrado da qualidade. Essa equipe foi formada por pesquisadores do Laboratório de Otimização de Produtos e Processos do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e profissionais da empresa de revestimentos cerâmicos.



A equipe de profissionais da empresa foi formada buscando envolver o máximo de pessoas, dando oportunidade para todos participarem, pois desta forma aumenta-se o comprometimento dos profissionais com o projeto.

Os profissionais da empresa participantes da equipe foram o chefe de produção, o apoio técnico, os técnicos e os operadores dos processos que seriam posteriormente monitorados. A equipe possuía um núcleo base formado pelo chefe de produção e apoio técnico que participaram de todas as reuniões e decisões referentes ao projeto. Porém, conforme a necessidade foram convidadas pessoas externas à equipe, como por exemplo o setor de vendas, para auxiliarem em etapas específicas da implantação.

### **5.1.3 Palestra de lançamento do projeto**

Foram realizadas duas palestras de apresentação do projeto para todos os funcionários da unidade e gerentes de outras unidades para apresentar uma visão geral sobre o controle integrado da qualidade, seus objetivos e cronograma de implantação.

## **5.2 Planejamento da implantação**

A equipe completa participou das reuniões de planejamento para que todos se sentissem co-responsáveis e tivessem um alto comprometimento com o sucesso do controle integrado da qualidade.

### **5.2.1 Desdobramento da qualidade**

Nessa etapa, foi realizado o levantamento da demanda de qualidade (voz do cliente) através de pesquisa realizada junto ao setor de vendas e atendimento ao cliente da empresa. Logo após, foi realizada a priorização dos itens da demanda de qualidade através do estabelecimento de um peso de importância relativa ( $W_i$ ) para cada um dos itens.

A fim de se estabelecer os pesos para os diferentes itens, questionou-se os profissionais do setor de vendas a respeito das características que o cliente valoriza nos produtos da empresa e consultou-se o histórico das reclamações dos clientes. Com isso gerou-se um peso para cada item da demanda de qualidade pela multiplicação desses dois critérios.

Os pesos finais para os itens de qualidade demandada, considerando tanto as reclamações dos clientes quanto a opinião dos clientes representada pelo setor de vendas, são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Pesos finais para os itens da demanda de qualidade no estudo de caso da empresa cerâmica.

<b>Demanda de qualidade</b>	<b>Pesos (<math>W_i</math>)</b>
Beleza	45
Resistência	25
Dimensional	15
Facilidade de limpeza	10
Facilidade de colocação	5

Em seguida, foram listadas as características de qualidade, que são aspectos mensuráveis da demanda de qualidade. Então, a demanda de qualidade foi cruzada com as características de qualidade usando-se a matriz da qualidade do QFD.

O preenchimento da matriz de qualidade foi feito com base na opinião da equipe técnica. A medição da intensidade da relação entre um item de qualidade demanda  $i$  e uma característica de qualidade  $j$ , designada por  $R_{ij}$ , foi realizada usando uma escala contínua de 0 a 9, onde 0 denota nenhuma relação e 9 denota uma relação de intensidade máxima. A partir do preenchimento da matriz, foi possível quantificar com objetividade as características de qualidade críticas, fortemente relacionadas com a satisfação dos clientes, gerando um índice de importância para a característica de qualidade ( $ICQ_j$ ). Esse índice foi calculado como o somatório do produto do peso relativo dos itens da qualidade demandada ( $W_i$ ) pela intensidade das relações atribuídas no interior da matriz ( $R_{ij}$ ). O formulário usado no cálculo do índice de importância para a característica de qualidade ( $ICQ_j$ ) aparece na eq. 4.22.

A Figura 5.1 traz a matriz da qualidade elaborada neste estudo de caso. O índice de importância para a característica de qualidade ( $ICQ_j$ ) aparece na última linha da matriz.

Qualidade Demandada	Características de Qualidade											
	Pesos ( $W_i$ )	Livre de defeitos superficial	Uniformidade na tonalidade	Resistência à abrasão	Resistência à flexão	Baixa absorção	Dimensões corretas	Peças planas	Coef. de atrito adequado	Espessura	Brilho	
	Beleza	45	9	9			6	6	3		1	6
	Resistência	25	3		9	9					6	
	Dimensional	15	1					9	6		9	
	Facilidade de limpeza	10	9				9			9		6
	Facilidade de colocação	5						9	9		9	
Índice da Caract. Qual ( $ICQ_j$ )		585	405	225	225	360	450	270	90	375	330	

Figura 5.1 Matriz da qualidade obtida no estudo de caso na empresa cerâmica.

## 5.2.2 Desdobramento dos processos

O próximo passo foi o desdobramento dos processos, que permitiu associar as características de qualidade do produto final com os parâmetros de processo e características de qualidade avaliadas durante o processo de manufatura.

Inicialmente, entendeu-se o macro-fluxo dos processos da empresa e então listou-se todos os processos de manufatura na ordem em que aparecem na linha de produção. Então, foi possível listar os parâmetros de processo e as características de qualidade avaliadas em cada processo e cruzá-los com as características de qualidade do produto final. Isso foi feito usando-se a matriz de processos do QFD.

O preenchimento da matriz foi realizado com base na opinião da equipe técnica, a qual foi questionada com respeito à intensidade das relações ( $R_{ij}$ ) entre as características de qualidade do produto  $j$  e os parâmetros e características de processo  $i$ .

Para a definição da importância para a qualidade de cada parâmetro e característica de qualidade do processo, gerou-se um índice de qualidade ( $IQP_i$ ), calculado como o somatório do produto do índice das características de qualidade do produto ( $ICQ_j$ ) pela intensidade das relações atribuídas no interior da matriz ( $R_{ij}$ ). O formulário usado no cálculo



do índice de qualidade dos parâmetros e características do processo ( $IQP_i$ ) aparece na eq. 4.23.

A Figura 5.2 apresenta uma parte da matriz dos processos realizada no estudo de caso. As colunas da matriz apresentam as características da qualidade avaliadas na matriz da qualidade (seus pesos relativos de importância,  $ICQ_j$ , estão apresentados abaixo dos rótulos das colunas), as linhas apresentam os parâmetros e características do processo, sendo que o índice de qualidade ( $IQP_i$ ) aparece na última coluna da matriz. Em sua versão integral, a matriz dos processos apresentava dimensão ( $130 \times 10$ ), ou seja, foram avaliadas as relações entre 130 parâmetros e características de processo e 10 características de qualidade de produto.

Após a identificação dos parâmetros e características de qualidade do processo críticos para a qualidade, verificou-se qual a capacidade e o conhecimento referente a esses parâmetros e características. Então, questionou-se junto à equipe técnica, qual o índice de capacidade de cada parâmetro e característica do processo ( $C_{pk}$ ), estimado a partir do percentual de observações fora de especificação, conforme a escala que aparece na Tabela 4.2. Na sequência questionou-se o conhecimento da equipe técnica a respeito do processo ( $C$ ), ou seja, se a equipe conhece o ajuste ótimo dos parâmetros e características de qualidade do processo e o efeito desses sobre as diversas características de qualidade do produto final. O conhecimento dos parâmetros e características do processo foi atribuído usando a escala que aparece na Tabela 4.3.

O objetivo foi gerar um índice de priorização dos parâmetros dos processos ( $IPP_i$ ) que combina valores de  $IQP$ ,  $C_{pk}$  e  $C$ , priorizando os parâmetros e características críticos para a qualidade percebida pelos clientes, oriundos de processos com baixa capacidade e pequeno conhecimento técnico. O formulário usado no cálculo do índice de priorização dos parâmetros e características dos processos ( $IPP_i$ ) aparece na eq. 4.24.

	Livre de defeitos superfic	Uniformidade na tonalidade	Resistência à abrasão	Resistência à flexão	Baixa absorção	Dimensões corretas	Peças planas	Coef. de atrito adequado	Espessura	Brilho	Índice de Qualidade	Capacidade	Conhecimento	Índice de Priorização
Índice da C.Q. (ICQj)	585	405	225	225	360	450	270	90	375	330	IQj	Cpkj	Ci	IPj
Colorimetria (De)	0,8	3,6	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	3,5	3435	0,8	0,2	21469
Densidade das argilas (g/cm3)	0,2	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	1104	1	0,9	1227
Viscosidade das argilas (s)	0,2	0,8	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	1104	0,63	0,8	2190
Resíduo das argilas	0,4	1,0	0,6	1,2	1,2	1,2	0,6	1,0	1,2	1,0	3048	0,5	0,6	10160
Densidade da barbotina (g/cm3)	0,6	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,6	1,0	1,2	3084	0,77	0,9	4450
Viscosidade da barbotina (s)	0,6	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	0,6	0,6	1,0	1,2	3084	0,67	0,9	5114
Resíduo da barbotina (%)	2,4	1,6	2,4	2,6	4,0	2,6	1,8	1,8	2,6	1,6	7938	1,13	0,95	7395
Tempo de moagem (h)	0,6	1,2	0,4	1,0	1,4	1,2	1,0	1,0	1,2	1,2	3402	1	0,8	4253
Densidade no tanque/vasca (g/cm3)	0,6	1,4	0,8	0,8	0,8	0,8	0,4	0,6	0,8	1,4	2850	0,77	0,8	4627
Viscosidade no tanque/vasca (s)	0,6	1,4	0,8	0,8	0,8	0,8	0,4	0,6	0,8	1,4	2850	1	0,65	4385
Granulometria (%)	2,0	3,2	1,2	1,2	1,6	1,4	0,8	1,0	1,4	3,2	6099	1	0,65	9383
Umidade (%)	0,6	2,2	1,4	1,8	2,4	2,4	1,6	1,0	2,4	2,2	6054	0,95	0,9	7081
Resistência a flexão (N/mm2)	0,4	0,1	1,4	3,0	0,4	0,4	0,6	0,3	0,4	0,0	1927,5	1	0,9	2142
Carga de ruptura (N)	0,4	0,1	1,4	3,0	0,4	0,1	0,6	0,3	0,1	0,0	1680	1	0,9	1867
Densidade aparente (g/cm3)	0,7	0,7	3,4	3,7	3,7	3,7	2,9	2,7	3,7	0,0	7701	0,9	1	8557
Carregamento (g)	0,4	0,7	1,1	2,7	2,1	3,1	1,7	0,6	3,1	0,0	5199	1	0,95	5473
Umidade (%)	0,9	1,1	0,9	1,7	2,1	1,9	1,4	0,6	1,9	1,0	4642,5	1	0,95	4887
Espessura (mm)	0,7	0,6	0,6	3,1	0,7	3,4	3,4	0,6	3,4	0,0	5514	1	0,95	5804
Pereba na superfície	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2340	0,9	0,95	2737
Trincas	3,7	0,0	0,3	3,4	0,7	0,6	0,0	0,0	0,6	0,0	3744	0,9	0,95	4379
Contaminação	3,4	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2556	0,8	0,7	4564
Reprensado	3,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,0	0,3	0,0	2439	0,9	0,95	2853
Faixa granulométrica	2,9	3,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3141	0,9	0,95	3674
Falha de prensa	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2340	0,77	0,95	3199
Luneta	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2340	0,9	0,95	2737
Ortogonalidade	0,3	0,0	0,0	0,3	0,0	4,0	0,8	0,0	4,0	0,0	3759	0,95	0,95	4165

Figura 5.2 Matriz do processo do estudo de caso na empresa cerâmica (parte da matriz completa).

### 5.2.3 Direcionamento das ações

Os parâmetros e características de qualidade dos processos analisados na matriz dos processos podem ser analisados individualmente quanto a possíveis ações visando a sua melhoria. As ações de melhoria consideradas pela equipe técnica incluíram o controle estatístico (indicando um possível parâmetro a ser monitorado pelo CIQ), bem como ações relacionadas a treinamento, desenvolvimento de fornecedor, projeto de experimentos, estudos ergonômicos, melhoria tecnológica (via aquisição de equipamentos), definição de procedimentos padronizados de operação, definição de especificações, análise do sistema de medição e auditoria.



A identificação de possíveis ações corretivas, bem como sua aplicabilidade na melhoria dos processos em estudo foi realizada utilizando a matriz dos processos. Para tanto, a equipe técnica utilizou uma escala contínua de 0 a 9, onde 0 denota nenhuma aplicabilidade e 9 denota aplicabilidade máxima da ação corretiva na melhoria do parâmetro ou característica de processo em questão.

A Figura 5.3 apresenta uma parte da matriz de ações obtida no estudo de caso. O preenchimento da matriz documentou as ações apropriadas para cada parâmetro e característica do processo. Além disso, resultaram identificados os parâmetros e características que devem fazer parte do controle integrado da qualidade.

		Ações possíveis										
		IPPI - Índice de Priorização	Controle integrado		Treinamento	Desenv. de fornecedores	Projeto de experimentos	Estudos ergonômicos	Aquisição de equipamentos	Certificação ISO 9000	Definição de procedimentos	Análise sistema de medição
Macro-fluxo	Índice da C.Q. (ICQj)											
Processos desdobrados	Moagem	Colorimetria (De)	21469	3	9		9	9	9	1	6	9
	Moagem	Densidade das argilas (g/cm3)	1227	3	3		6			1	3	3
	Moagem	Viscosidade das argilas (s)	2190	6			9		9	1		
	Moagem	Resíduo das argilas	10160	3		3	9	9		1	9	
	Moagem	Densidade da barbotina (g/cm3)	4450	6		3	9	6	9	1		9
	Moagem	Viscosidade da barbotina (s)	5114	9		3				1	9	3
	Moagem	Resíduo da barbotina (%)	7395	6	3		9	6	9	1		6
	Moagem	Tempo de moagem (h)	4253	6			6			1	3	6
	Atomização	Densidade no tanque/vasca (g/cm3)	4627	3	3		6			1		
	Atomização	Viscosidade no tanque/vasca (s)	4385	3	6					1		
	Atomização	Granulometria (%)	9383	3			9			1		6
	Atomização	Umidade (%)	7081	9				3	6	1	3	
	Modelagem	Resistência a flexão (N/mm2)	2142	9				3	6	1	3	
	Modelagem	Carga de ruptura (N)	1867	3						1	3	3
	Modelagem	Densidade aparente (g/cm3)	8557	3		6		9	9	1	9	6
	Modelagem	Carregamento (g)	5473	3	3		6			1		
	Modelagem	Umidade (%)	4887	3	3		6	9		1	3	6
	Modelagem	Espessura (mm)	5804	3						1		
	Modelagem	Pereba na superfície	2737	6	3		6			1		3
	Modelagem	Trincas	4379	3	3					1	3	
	Modelagem	Contaminação	4564	3			6			1		
	Modelagem	Reprensado	2853	3	3		6			1	3	3
	Modelagem	Faixa granulométrica	3674	3		3		3	9	1		
	Modelagem	Falha de prensa	3199	6	3		6			1		
	Modelagem	Luneta	2737	3	3		6			1	3	
	Modelagem	Ortogonalidade	4165	6	3		6		9	1		6

Figura 5.3 Matriz de ações do estudo de caso na empresa cerâmica (parte da matriz completa).



## 5.2.4 Identificação dos postos de controle e parâmetros e características de qualidade do processo a serem monitoradas em cada posto

Com o auxílio da matriz de processos e a proximidade física dos processos, a equipe técnica definiu os postos de controle e os respectivos parâmetros e características de qualidade que serão monitoradas em cada posto pelas cartas de controle. A Tabela 5.3 traz os postos de controle definidos para o estudo de caso. Na Tabela 5.4, são apresentados, como exemplo, os parâmetros e características de qualidade dos processos monitorados no posto modelagem (prensas), definido como o quarto posto de controle no estudo de caso.

Tabela 5.3 Descrição dos postos de controle definidos no estudo de caso da empresa cerâmica.

Número	Descrição do posto
Posto 1	Recepção de matéria-prima
Posto 2	Moagem
Posto 3	Atomização
Posto 4	Modelagem (prensas)
Posto 5	Decoração
Posto 6	Queima (fornos)
Posto 7	Polimento
Posto 8	Classificação

Tabela 5.4 Parâmetros e características de qualidade do processo do posto 4 – modelagem.

Parâmetros e características de qualidade do posto 4
Resistência a flexão (N/mm <sup>2</sup> )
Carga de ruptura (N)
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
Carregamento (g)
Umidade (%)
Espessura (mm)
Pereba na superfície
Trincas
Contaminação
Reprensado
Faixa granulométrica
Falhado de prensa
Luneta
Ortogonalidade

### 5.2.5 Definição de critérios de classificação dos produtos (filtros)

Nessa etapa, definiu-se os critérios de classificação (também denominados filtros) que serão utilizados posteriormente na análise das cartas do controle integrado da qualidade. Essas informações são registradas em conjunto com os dados de qualidade. Os critérios de classificação definidos para o estudo de caso são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 Descrição dos critérios de classificação.

<b>Critério</b>	<b>Descrição do critério</b>	<b>Tipo de critério</b>
Critério 1	Linha de produção	Somente filtro
Critério 2	Máquina	Controle em paralelo
Critério 3	Tipo de massa	Especificações
Critério 4	Bitola	Especificações
Critério 5	Subgrupo do produto	Somente filtro
Critério 6	Referência	Somente filtro
Critério 7	Decoração	Especificações
Critério 8	Turno	Somente filtro

Os critérios *linha de produção*, *subgrupo do produto*, *referência* e *turno* são do tipo *somente filtro*, pois a sua única função é classificar o produto para que posteriormente seja possível realizar uma análise da qualidade, filtrando-se as observações de acordo com esses critérios de classificação.

Os critérios de classificação *tipo de massa*, *bitola* e *decoreção* são do tipo *especificações*, pois, além de classificarem os produtos, também alteram as especificações dos parâmetros e características do processo. O critério máquina é do tipo *controle em paralelo*, pois o volume de produção se divide pelo número de máquinas do posto.

### 5.2.6 Descrição dos parâmetros e características de qualidade do processo

Nesta etapa, foi definido se o item de controle é parâmetro do processo ou característica de qualidade, se é do tipo variável ou atributo, se é do tipo nominal-é-melhor, maior-é-melhor ou menor-é-melhor, sua unidade de medição, suas especificações, se é refugo ou pode ser retrabalhado e o quanto custa refugar ou retrabalhar o parâmetro ou a característica em questão. Na Tabela 5.6, apresenta-se, como exemplo, a descrição dos parâmetros e características do processo do posto 4 – modelagem do estudo de caso.

Tabela 5.6 Descrição dos parâmetros e características dos processos do posto 4-modelagem.

	Processo (1) /Característica (0)	Tipo de Variável	Unidade de medição	Especificação Inferior	Alvo (Valor Nominal)	Especificação Superior	Retrabalho/Reclas./Refugo	Proporção do custo (%)
<b>Parâm. e carac. dos processos</b>								
Resistência a flexão	0	MM	N/mm <sup>2</sup>	1	2	2	Rf	0,5
Carga de ruptura 30 × 30	0	MM	N	50	90	90	Rf	0,5
40 × 40	0	MM	N	50	130	130	Rf	0,5
50 × 50	0	MM	N	50	160	160	Rf	0,5
Densidade aparente	0	NM	(g/cm <sup>3</sup> )	1,8	1,88	2	Rt	0,02
Carregamento 30 × 30	0	NM	(g)	1800	1850	1940	Rf	0,5
40 × 40	0	NM	(g)	3600	3650	3740	Rf	0,5
50 × 50	0	NM	(g)	6450	6460	6500	Rf	0,5
Umidade base	1	NM	(%)	6,0	6,5	7,0	Rt	0,01
Bianco	1	NM	(%)	6,5	7,0	7,5	Rt	0,01
Espessura 30 × 30	0	NM	mm	9,2	9,3	9,4	Rf	0,5
40 × 40	0	NM	mm	10,2	10,3	10,4	Rf	0,5
50 × 50	0	NM	mm	11,0	11,1	11,2	Rf	0,5
Pereba na superfície	0	NM	%	0	0	1	Rt	0,05
Trincas	0	mM	%	0	0	1	Rt	0,06
Contaminação	0	mM	%	0	0	1	Rf	0,5
Reprensado	0	mM	%	0	0	1	Rt	0,7
Faixa granulométrica	0	mM	%	0	0	1	Rf	0,5
Falhado de prensa	0	mM	%	0	0	1	Rt	0,03
Luneta	0	mM	%	0	0	1	Rt	0,09
Ortogonalidade	0	mM	%	0	0	1	Rf	0,5

### 5.2.7 Definição do procedimento de coleta de dados

Nessa etapa, foram definidos: (a) o tipo de carta de controle; (b) o tamanho da amostra; (c) a frequência de amostragem; (d) a forma de registro dos dados (registro eletrônico em computador ou em planilha de papel) e (e) o sistema de medição. Na Tabela 5.7, apresenta-se, como exemplo, a descrição do procedimento de coleta de dados do posto 4 – modelagem.



Tabela 5.7 Definição do procedimento de coleta de dados do posto 4-modelagem.

	Variável/atributo	Tipo de carta	Tamanho de amostra	Frequência	Registro dos dados	Sistema de medição	Sistema de medição
<b>Parâm. e carac. do processo</b>							
Resistência à flexão	V	M	3 peças x no cav	1 x dia	planilha	instrumental	Ok
Carga de ruptura 30 x 30	V	M	3 peças x no cav	1 x dia	planilha	instrumental	Ok
40 x 40	V	M	3 peças x no cav	1 x dia	planilha	instrumental	Ok
50 x 50	V	M	3 peças x no cav	1 x dia	planilha	instrumental	Ok
Densidade aparente	V	M	3 locais x no cav	1 x dia	planilha	instrumental	NOK
Carregamento 30 x 30	V	M	no cav	1 x turno	planilha	instrumental	Ok
40 x 40	V	M	no cav	1 x turno	planilha	instrumental	Ok
50 x 50	V	M	no cav	1 x turno	planilha	instrumental	Ok
Umidade base	V	VI	1 val ind p/ prensa	2 x turno	planilha	instrumental	Ok
branco	V	VI	1 val ind p/ prensa	2 x turno	planilha	instrumental	Ok
Espessura 30 x 30	V	M	no cav x 4 lados	3 x turno	planilha	instrumental	NOK
40 x 40	V	M	no cav x 4 lados	3 x turno	planilha	instrumental	NOK
50 x 50	V	M	no cav x 4 lados	3 x turno	planilha	instrumental	NOK
Pereba na superfície	A	M	1 peça x no cav	2 x turno	planilha	visual	Ok
Trincas	A	p	1 peça x no cav	2 x turno	planilha	visual	Ok
Contaminação	A	p	1 peça x no cav	2 x turno	planilha	visual	Ok
Reprensado	A	p	1 peça x no cav	2 x turno	planilha	visual	Ok
Faixa granulométrica	A	p	1 peça x no cav	2 x turno	planilha	visual	Ok
Falhado de prensa	A	p	1 peça x no cav	2 x turno	planilha	visual	Ok
Luneta	A	p	1 peça x no cav	2 x turno	planilha	visual	Ok
Ortogonalidade	A	p	1 peça x no cav	2 x turno	planilha	visual	Ok

### **5.2.8 Avaliação do sistema de medição**

Uma vez definido o sistema de medição, foi necessário avaliar a sua capacidade. Na última coluna da Tabela 5.7, apresenta-se, como exemplo, o resultado da avaliação do sistema de medição dos parâmetros e características do processo do posto 4 – modelagem do estudo de caso. Em função dessa análise, algumas melhorias foram realizadas no sistema de medição.

### **5.2.9 Definição de responsabilidades**

Nesta etapa, foram definidos os responsáveis pela coleta, digitação, monitoramento, ações em causas especiais, cálculo dos limites de controle e estudos de capacidade. A Tabela 5.8 apresenta, como exemplo, a definição de atribuições e responsabilidades do posto 4 – modelagem do estudo de caso. Como pode ser visto, o monitoramento é feito por operadores e os cálculos de limites de controle e estudos de capacidade são feitos por supervisores. Criou-se também um grupo de apoio à qualidade (GAP) que é chamado caso o operador e supervisor não consigam tomar as ações corretivas necessárias para eliminar a causa especial e tornar o processo estável novamente. A escolha das atribuições foi realizada em função do nível de instrução das pessoas envolvidas.

Tabela 5.8 Definição de responsabilidades do posto 4 – modelagem.

	Responsável pela coleta	Responsável pela digitação	Responsável pelo monitoramento	Responsável pela ação corretiva	Responsável pelo cálculo dos limites de controle	Responsável pelo est. de capacidade
<b>Parâmetros e características do processo</b>						
Resistência a flexão (N/mm <sup>2</sup> )	operador	operador	operador	op/sup/GAQ	supervisor	supervisor
Carga de ruptura (N)	operador	operador	operador	op/sup/GAQ	supervisor	supervisor
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	operador	operador	operador	op/sup/GAQ	supervisor	supervisor
Carregamento (g)	operador	operador	operador	op/sup/GAQ	supervisor	supervisor
Umidade (%)	operador	operador	operador	op/sup/GAQ	supervisor	supervisor
Espessura (mm)	operador	operador	operador	op/sup/GAQ	supervisor	supervisor
Pereba na superfície	operador	operador	operador	op/sup/GAQ	supervisor	supervisor
Trincas	operador	operador	operador	op/sup/GAQ	supervisor	supervisor
Contaminação	operador	operador	operador	op/sup/GAQ	supervisor	supervisor
Reprensado	operador	operador	operador	op/sup/GAQ	supervisor	supervisor
Faixa granulométrica	operador	operador	operador	op/sup/GAQ	supervisor	supervisor
Falhado de prensa	operador	operador	operador	op/sup/GAQ	supervisor	supervisor
Luneta	operador	operador	operador	op/sup/GAQ	supervisor	supervisor
Ortogonalidade	operador	operador	operador	op/sup/GAQ	supervisor	supervisor

### 5.2.10 Definição da documentação necessária

Nesta etapa foram elaboradas as planilhas de coleta de dados utilizadas em cada posto de controle e as planilhas de registro de ocorrência de causas especiais. As planilhas de coleta de dados contêm todas as variáveis e atributos monitorados em cada posto de trabalho e informações sobre os critérios de classificação dos dados coletados. A Figura 5.4 apresenta, como exemplo, a planilha de coleta de dados do posto 4 – modelagem.



Planilha de coleta de dados - Posto 4 - Modelagem											
Data: ____/____/____	TURNO A				TURNO B				TURNO C		
Tipo de massa											
Bitola											
Subgrupo											
Referência											
Horas	07:00	09:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00	21:00	23:00	01:00	03:00
Pereba na superfície											
Trincas											
Contaminação											
Reprensado											
Faixa granulométrica											
Falhado de prensa											
Luneta											
Ortogonalidade											
Resistência à flexão	1										
	2										
	3										
	4										
Carga de ruptura	1										
	2										
	3										
	4										
Densidade aparente	1										
	2										
	3										
	4										
Carregamento	1										
	2										
	3										
	4										
Espessura	1										
	2										
	3										
	4										
Umidade											

Figura 5.4 Planilha de coleta de dados do posto 4 – modelagem.

### 5.3 Treinamento em controle integrado da qualidade

O treinamento foi realizado antes da implantação efetiva do controle integrado com diferentes níveis de detalhamento, atendendo às diferentes funções na empresa.

Os supervisores e engenheiros receberam treinamento em estudos de estabilidade e capacidade e os operadores em preenchimento de planilha, digitação de dados no *software* (carta de controle no *software*) e análise das cartas de controle.

### 5.4 Implantação efetiva

A implantação efetiva compreendeu, de forma geral, as seguintes etapas:

### **5.4.1 Início do monitoramento**

Nessa etapa, iniciou a coleta de dados, respeitando o tamanho da amostra e frequência estabelecidas na fase de planejamento, e a utilização do *software* dedicado ao controle integrado da qualidade.

### **5.4.2 Cálculo dos limites de controle**

O cálculo dos limites de controle foram realizados somente após a coleta de dados representativos do processo. O cálculo dos limites da carta integrada do posto só foi possível após a coleta de dados suficientes para todos os parâmetros e características do posto, o que levou algumas semanas, conforme a frequência de amostragem do posto em questão. Uma vez calculados os limites, no caso de aparecimento de causas especiais, esses foram recalculados, após identificação e eliminação das causas de anomalia no processo.

## **5.5 Acompanhamento e consolidação**

A seguir, apresenta-se um exemplo de um estudo de estabilidade e capacidade direcionado pela estratégia do controle integrado da qualidade. Neste estudo, são usados dados hipotéticos simulados a partir das especificações dos parâmetros e características para preservar a confidencialidade dos dados reais obtidos junto à empresa. Os dados hipotéticos referem-se a um processo simplificado com apenas seis postos: posto I-moagem, posto II-atomização, posto III-modelagem, posto IV-queima, posto V-polimento e posto VI-classificação e com apenas dois tipos critérios de classificação: tipo de massa subdividido em base e branco e tipo de bitola subdividido em 30 x 30 cm<sup>2</sup> e 40 x 40 cm<sup>2</sup>.

Vale ressaltar que existem várias estratégias para a solução de um problema com os recursos disponíveis no controle integrado da qualidade, sendo que será demonstrada apenas uma para ilustrar.

### **5.5.1 Identificação do posto e item de controle mais crítico**

Observando-se as cartas de controle dos diversos postos de controle, verificou-se que o posto V – polimento apresentava um processo com um percentual de defeituosos muito alto

de 96%. A Figura 5.5 apresenta a carta integrada do posto V - polimento agrupando os produtos fabricados com os dois tipos de massa (base e bianco) e dois tamanhos de bitola ( 30 x 30 cm<sup>2</sup> e 40 x 40 cm<sup>2</sup>).

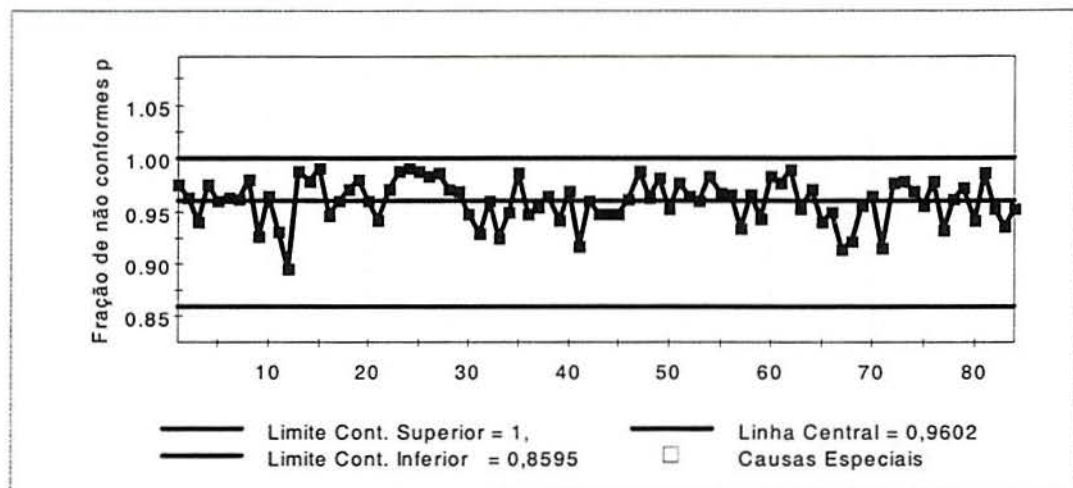


Figura 5.5 Carta integrada do posto V - polimento agrupando os produtos fabricados com os dois tipos de massa (base e bianco) e dois tamanhos de bitola (30 x 30 e 40 x 40).

Para identificar qual dos parâmetros e/ ou características de qualidade do processo que estão contribuindo de forma mais acentuada para o alto percentual de defeituosos da carta do posto V, consultou-se o gráfico de Pareto. A Figura 5.6 apresenta o Pareto do posto V – polimento agrupando os produtos fabricados com os dois tipos de massa (base e bianco) e dois tamanhos de bitola (30 x 30 cm<sup>2</sup> e 40 x 40 cm<sup>2</sup>).



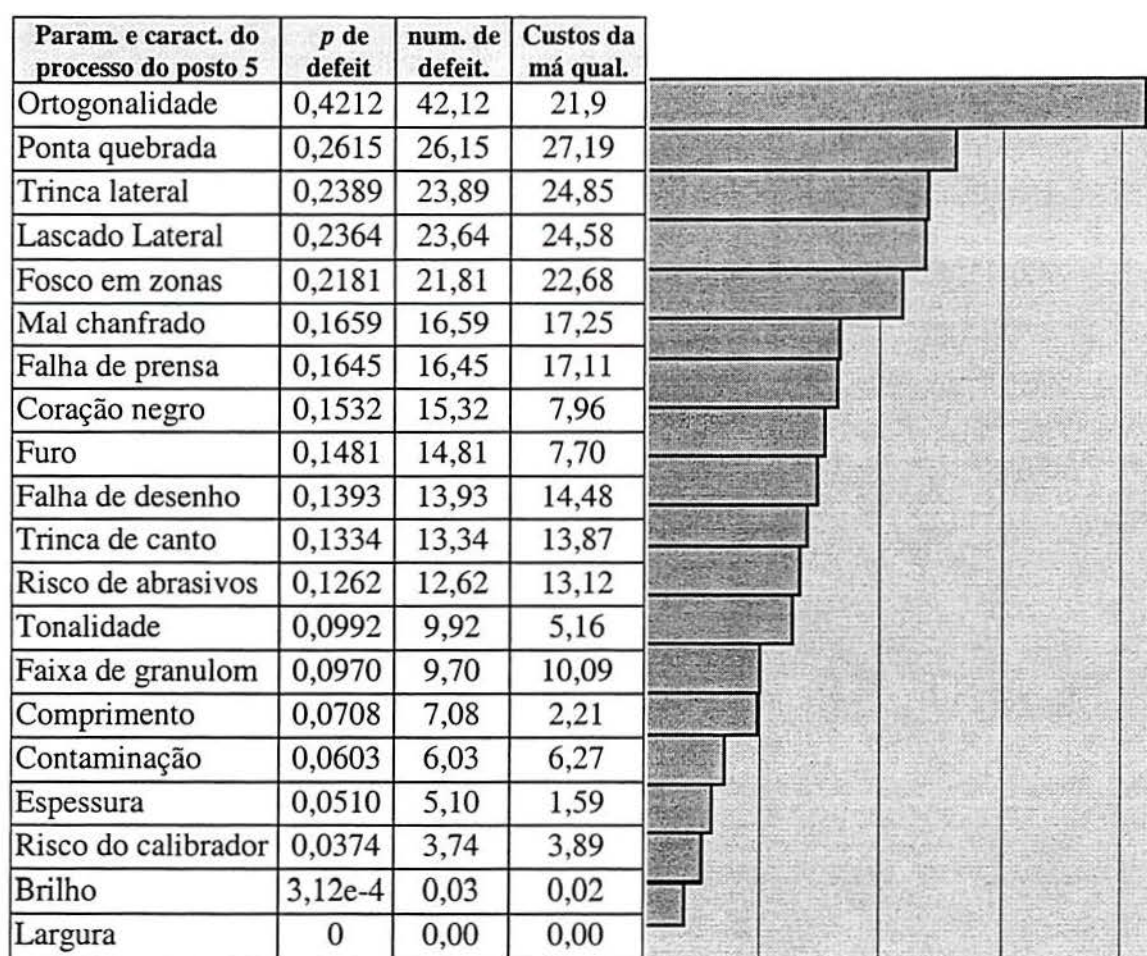


Figura 5.6 Gráfico de Pareto para o posto V - polimento agrupando os produtos fabricados com os dois tipos de massa (base e branco) e dois tamanhos de bitola (30 x 30 e 40 x 40).

Verificou-se no Pareto da Figura 5.6 que a característica de qualidade ortogonalidade apresentava um percentual de defeituosos muito alto de 42% (segunda coluna do gráfico de Pareto).

### 5.5.2 Identificação da origem do problema

A fim de encontrar a origem do alto percentual de peças com ortogonalidade inadequada, investigou-se o posto III – modelagem, uma vez que esse tipo de defeito está fortemente relacionado com a densidade aparente monitorada nesse posto. Segundo Henrique (1997), uma diminuição da densidade aparente gera uma variação mais acentuada da contração linear com a temperatura, o que favorece a instabilidade nas dimensões e ortogonalidade das peças acabadas, frente a possíveis variações de temperatura.

A Figura 5.7 apresenta a carta integrada do posto III – modelagem agrupando os produtos fabricados com os dois tipos de massa (base e branco) e dois tamanhos de bitola (30 x 30 cm<sup>2</sup> e 40 x 40 cm<sup>2</sup>).

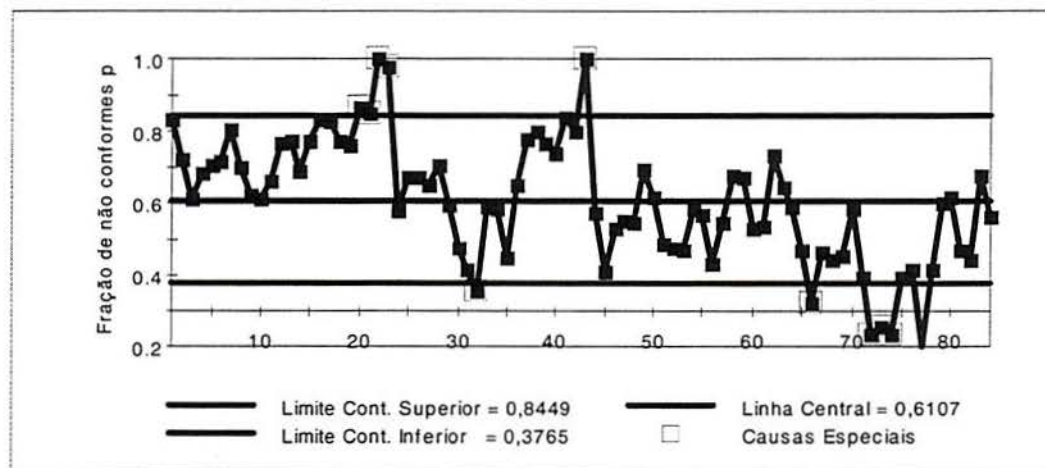


Figura 5.7 Carta integrada do posto III - modelagem agrupando os produtos fabricados com os dois tipos de massa (base e branco) e dois tamanhos de bitola (30 x 30 e 40 x 40).

Com o objetivo de rastrear melhor a origem das peças defeituosas, realizou-se uma análise do posto III - modelagem separadamente para produtos realizados com diferentes tipos de massa. A Figura 5.8 apresenta a carta integrada para o posto III - modelagem filtrando os produtos fabricados com o tipo de massa branco e agrupando os dois tamanhos de bitola (30 x 30 cm<sup>2</sup> e 40 x 40 cm<sup>2</sup>). A Figura 5.9 apresenta a carta integrada para o posto III - modelagem filtrando os produtos fabricados com o tipo de massa base e agrupando os dois tamanhos de bitola (30 x 30 cm<sup>2</sup> e 40 x 40 cm<sup>2</sup>).

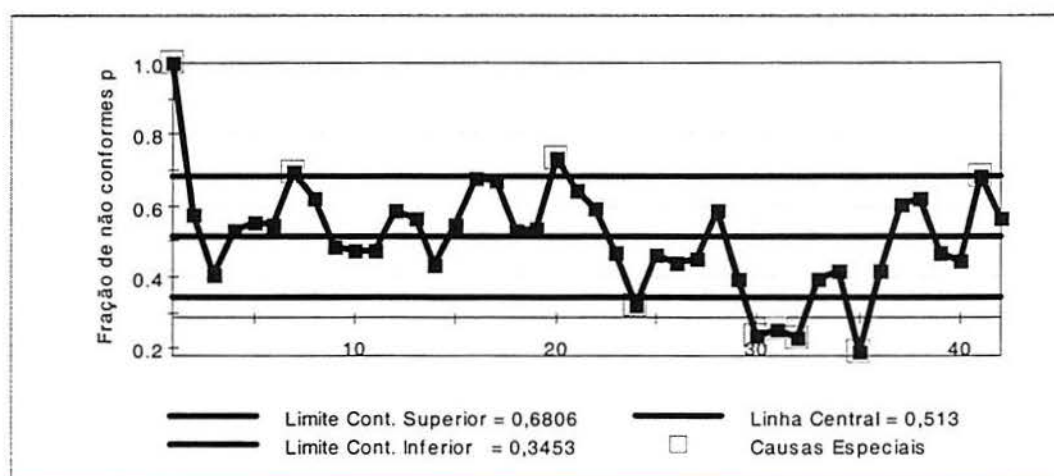


Figura 5.8 Carta do posto III - modelagem filtrando os produtos fabricados com tipo de massa branco e agrupando os dois tamanhos de bitola (30 x 30 e 40 x 40).



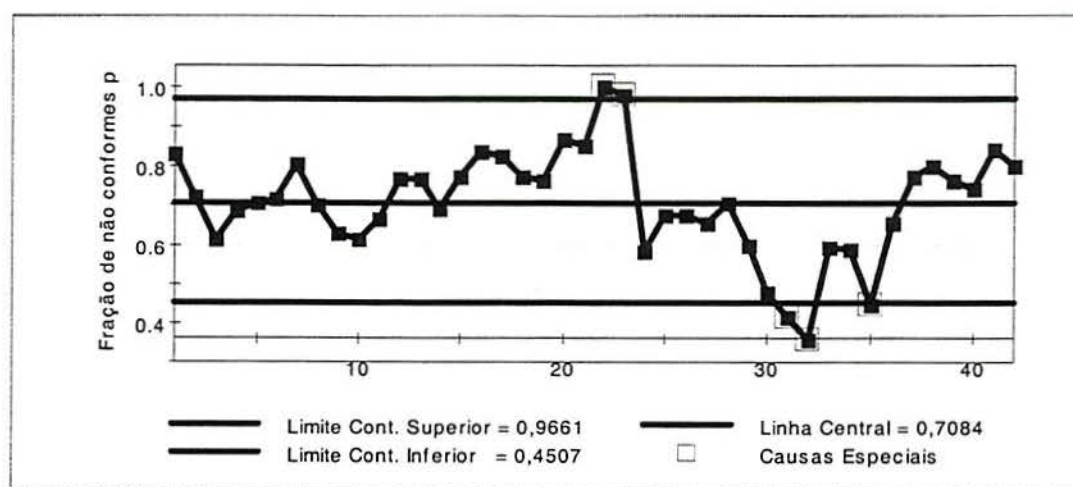


Figura 5.9 Carta do posto III - modelagem filtrando os produtos fabricados com tipo de massa base e agrupando os dois tamanhos de bitola (30 x 30 e 40 x 40).

Como pode-se observar, tanto a carta de controle da massa branco como a carta de controle da massa base revelam falta de estabilidade (causas especiais) e percentuais médios muito altos, respectivamente 51% e 71%. Neste exemplo, a análise irá continuar focando no tipo de massa base e investigando os produtos fabricados com os dois tamanhos de bitola 30 x 30 cm<sup>2</sup> e 40 x 40 cm<sup>2</sup> separadamente.

A Figura 5.10 apresenta a carta integrada do posto III - modelagem filtrando os produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 40 x 40 cm<sup>2</sup>. A Figura 5.11 apresenta a carta integrada do posto III - modelagem, filtrando os produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 30 x 30 cm<sup>2</sup>.

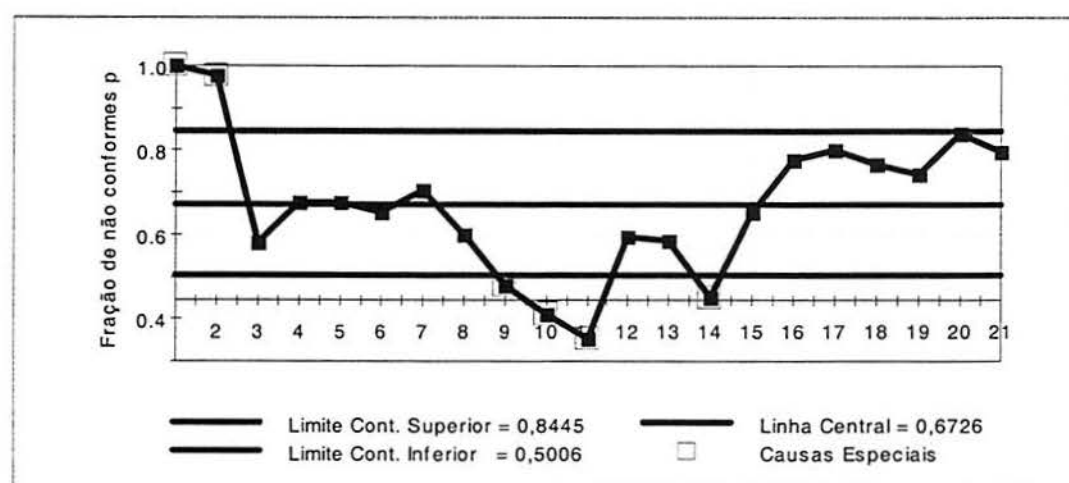


Figura 5.10 Carta de controle integrada do posto III filtrando os produtos produzidos com tipo de massa base e bitola 40 x 40.



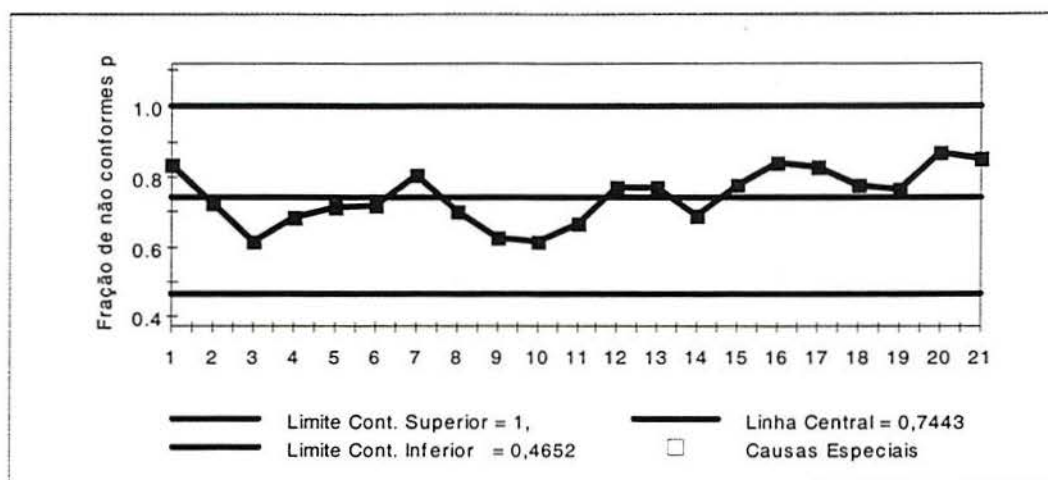


Figura 5.11 Carta de controle integrada do posto III filtrando os produtos produzidos com tipo de massa base e bitola 30 x 30.

Como pode-se observar, ambas as bitolas apresentam problemas pronunciados. A carta de controle dos produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 40 x 40 cm<sup>2</sup> revela falta de estabilidade (muitas causas especiais) e um percentual médio de 67% de defeituosos. A carta de controle dos produtos fabricados com o tipo de massa base e bitola 30 x 30 cm<sup>2</sup> apresenta estabilidade, mas o percentual de defeituosos é ainda mais alto 74%. A análise continuará focando nos produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 30 x 30 cm<sup>2</sup>.

### 5.5.3 Priorização das ações de melhoria

Para identificar qual dos parâmetros e/ ou características de processo que estão contribuindo de forma mais acentuada para o percentual de defeituosos da carta do posto III - modelagem, consultou-se o gráfico de Pareto, filtrando-se os produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 30 x 30 cm<sup>2</sup>.

A Figura 5.12 apresenta o Pareto do posto III – modelagem, filtrando os produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 30 x 30 cm<sup>2</sup>.

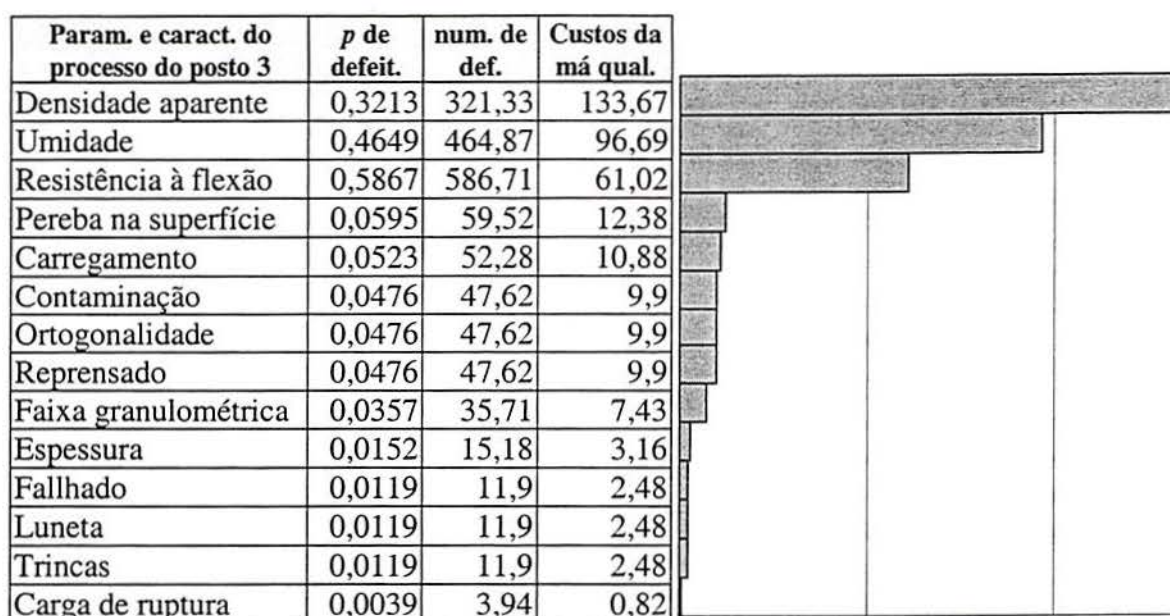


Figura 5.12 Gráfico de Pareto para o posto III – modelagem filtrando os produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 30 x 30.

Como geralmente não há recursos financeiros e humanos suficientes para resolver todos os problemas, o princípio de Pareto é agir nos poucos problemas vitais. Ou seja, atacar primeiramente os parâmetros e características de qualidade do processo com percentuais mais altos pois, uma vez que esses sejam resolvidos, seus percentuais de defeituosos baixam e priorizam-se os subsequentes na lista, até que todos sejam resolvidos. No Pareto da Figura 5.12, observa-se que, conforme intuído, a características de processo que está provocando o maior custo da má qualidade (quarta coluna do Pareto) é a densidade aparente. Logo, seguindo o princípio de Pareto, priorizou-se analisar os gráficos de estabilidade e capacidade dessa característica individualmente.

#### 5.5.4 Estudos de estabilidade e capacidade

A Figura 5.13 e Figura 5.14 apresentam respectivamente a carta de média e desvio-padrão para a densidade aparente filtrando os produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 30 x 30 cm<sup>2</sup>.

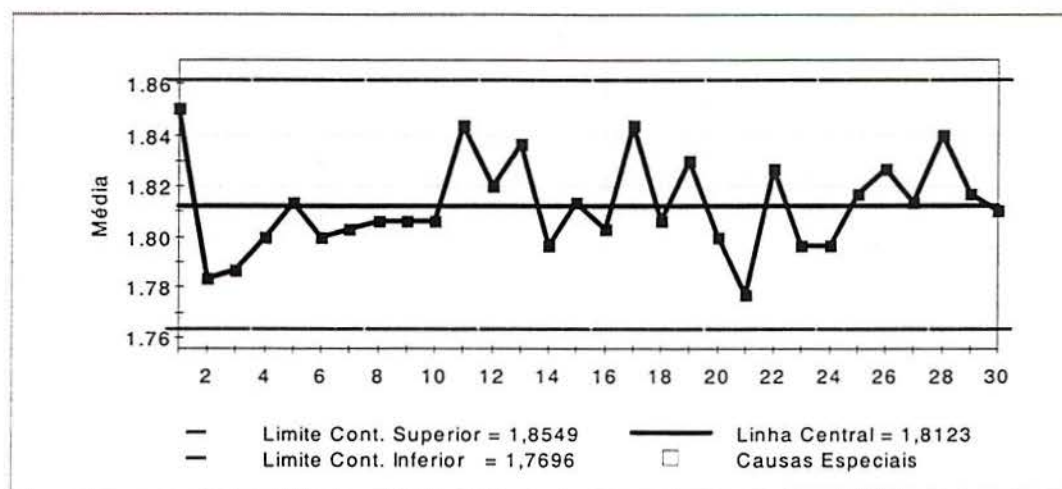


Figura 5.13 Carta de média da densidade aparente filtrando os produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 30 x 30.

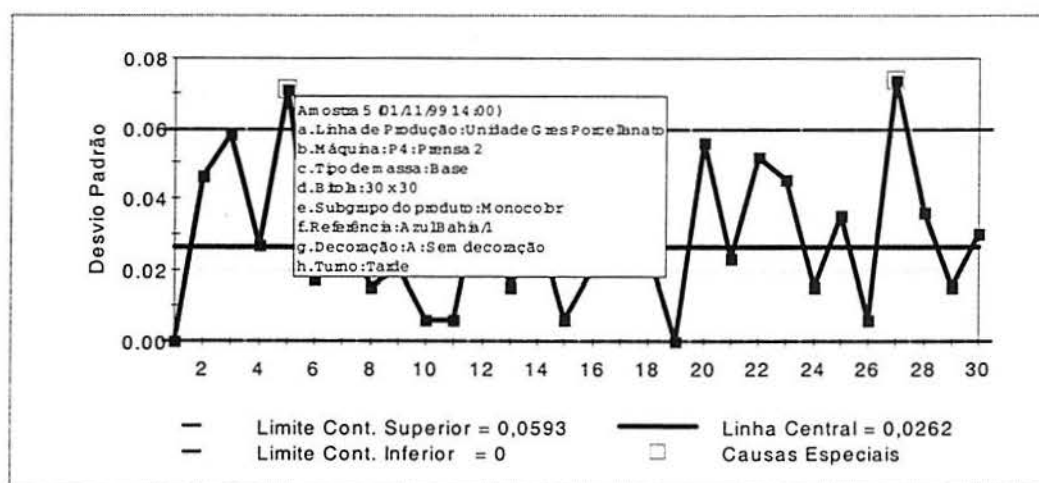


Figura 5.14 Carta de desvio-padrão da densidade aparente filtrando os produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 30 x 30.

Como pode-se observar nas cartas de controle, o processo apresenta duas causas especiais (amostras 5 e 27) no gráfico de desvio-padrão, indicando um aumento na variabilidade da densidade aparente, fora do padrão natural. Clicando-se em cima da causa especial, identifica-se a data e horário em que a peça foi fabricada, assim como a descrição da peça segundo os critérios de classificação (filtros). Essa informação é útil para rastrear a causa especial e mais facilmente identificar e resolver a origem do problema. A responsabilidade de resolver uma causa especial, a princípio, é do operador pois está associada a uma causa específica.

A Figura 5.15 apresenta o estudo de capacidade filtrando os produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 30 x 30 cm<sup>2</sup>.



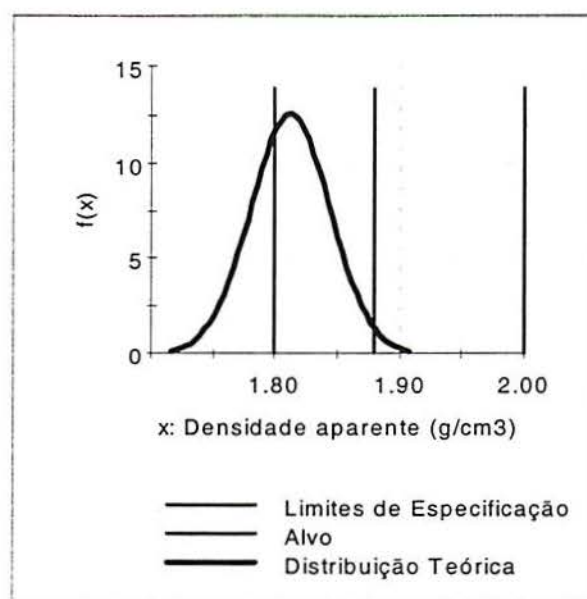


Figura 5.15 Estudo de capacidade da densidade aparente filtrando os produtos fabricados com tipo de massa base e bitola 30 x 30.

A densidade aparente é uma característica do tipo nominal-é-melhor, cujo valor alvo é  $1,88 \text{ g/cm}^3$ . No entanto, como pode-se observar na Figura 5.15, o processo está descentrado. A densidade aparente média é de  $1,81 \text{ g/cm}^3$  enquanto que o valor alvo é  $1,88 \text{ g/cm}^3$ , logo 34,89 % das vezes a densidade está abaixo do limite inferior de  $1,80 \text{ g/cm}^3$ . Esta característica não é efetivamente capaz ( $Cpk = 0,12$ ), mas centrando o processo, ou seja, trazendo a densidade aparente para o valor alvo de  $1,88 \text{ g/cm}^3$ , o processo torna-se capaz ( $Cp = 1,05$ ).

### 5.5.5 Possíveis causas especiais responsáveis pelos defeitos de modelagem

Os estudos de estabilidade e capacidade orientam a necessidade de ações, mas as ações dependem do conhecimento técnico acumulado. A seguir, são listadas as possíveis causas de defeitos de modelagem, ilustrando-se o tipo de conhecimento técnico que deve ser de domínio da equipe para que as ações sejam efetivas.

Segundo Henrique (1997), a principal origem dos defeitos oriundos na modelagem é a incorreta realização do enchimento do molde. A uniformidade do enchimento dos moldes depende das características do pó que se prensa, da velocidade de enchimento do molde, da forma, do tamanho, da distribuição e do número de peças que se moldam.

A característica do pó compreende as características das partículas (natureza, tamanho, distribuição, forma, etc.), dos aglomerados de partículas (forma, tamanho,

distribuição dos grânulos ou aglomerados, etc.) e dos aditivos de prensagem (umidade, ligante, plastificantes, etc.). Essas características, que são função da composição e da preparação da massa, determinam as propriedades ou parâmetros tecnológicos do pó, tais como: densidade aparente, fluidez, compactação, etc.

Uma boa fluidez do pó permite que o enchimento do molde realize-se a velocidades elevadas sem prejuízo da uniformidade da peça prensada. Além de uma boa fluidez, o pó deve possuir uma densidade aparente adequada que é função do volume de poros intergranulares (vazios exteriores aos grãos que se formam no empacotamento do pó ao encher o molde) e da densidade dos grãos ou aglomerado. A densidade do aglomerado depende do processo de preparação da massa (via seca ou via úmida), das variáveis do processo utilizadas (densidade da barbotina, moagem, umidade de granulação, etc.) e da forma e distribuição das partículas que compõem o aglomerado.

A primeira prensagem e o período de desaeração têm por objetivo liberar a maior parte de ar presente no molde. Para uma realização correta destas duas etapas, a pressão de primeira prensagem e o tempo de desaeração devem ser escolhidos convenientemente para que a peça neste estado seja suficientemente permeável e disponha do tempo necessário para permitir a quase total difusão do ar. A segunda prensagem é a etapa que mais contribui para configurar a microestrutura a cru da peça, conferindo suas propriedades. Durante a extração da peça do molde pode-se originar fissuras ou deformações motivadas pelas tensões de cisalhamento que se originam na peça por atrito com a parede do molde.

Alguns dos defeitos de prensagem podem ser atribuídos à variação do carregamento do estampo provocada pelos fatores a seguir.

a) distribuição das palhetas: as palhetas do carro alimentador tem a função de arrastar o pó para encher o estampo e distribuí-lo uniformemente; onde há palheta não há pó e portanto, o estampo ficará menos carregado nesta zona; desta forma, palhetas mal distribuídas, torcidas, dobradas, sujas ou com altura inadequada podem gerar diferenças no carregamento do estampo.

b) velocidade do carro: qualquer variação na velocidade do carro produzirá uma variação na distribuição da carga; se a velocidade é muito alta, pode lançar o pó para frente, possibilitando a formação de vazios na matriz do estampo; a velocidade do carro alimentador deverá ser regulada de acordo com a primeira queda dos punções superiores.

c) nivelamento correto do carro: deve-se comprovar que o carro esteja bem nivelado, na posição de repouso e também em movimento; em algumas situações pode ser necessário



desnívelar ligeiramente o carro alimentador para compensar algum defeito de carregamento mais difícil.

d) distribuição de pó no silo de alimentação: os agregados grossos e finos não devem ficar acumulados em zonas distintas no silo de alimentação do carro pois geram diferenças de compactação.

e) limpeza da borracha e régua: é muito importante que tanto a borracha expulsora como a régua niveladora estejam em bom estado e limpas, já que igualam a parte superior da carga no estampo.

## **5.6 Considerações finais do capítulo**

### **5.6.1 Considerações referentes ao estudo de caso no setor cerâmico**

Com os dados disponíveis no controle integrado da qualidade foi possível priorizar as ações de melhoria nos parâmetros e características de processo mais críticos. Neste estudo, por exemplo, foi possível identificar, pelas cartas integradas do posto, que o posto V - polimento apresentava o maior percentual de defeituosos e, pelo gráfico de Pareto, que a característica ortogonalidade contribuía de forma mais acentuada para esse alto percentual de defeituosos. Com o conhecimento técnico de materiais cerâmicos, identificou-se o posto III - modelagem como responsável pelo alto percentual de peças com ortogonalidade inadequada no posto V. Através das cartas integradas do posto III - modelagem, filtradas pelos diferentes critérios de classificação, identificou-se que os produtos fabricados com o tipo de massa base e tamanho de bitola 30 x 30 cm<sup>2</sup> apresentavam o maior percentual de defeituosos do posto III. Pelo gráfico de Pareto, filtrando apenas os produtos com tipo de massa base e tamanho de bitola 30 x 30 cm<sup>2</sup>, foi possível identificar que a característica densidade aparente contribuía de forma mais acentuada para o alto percentual de defeituosos. Realizou-se então, o estudo de estabilidade e capacidade da densidade aparente para os produtos com tipo de massa base e tamanho de bitola 30 x 30 cm<sup>2</sup>. Pela carta de controle do desvio-padrão do estudo de estabilidade, identificou-se duas amostras com variabilidade excessiva, fora do padrão natural daquela característica. Verificando-se as amostras, foi possível identificar as datas e horários da ocorrência das causas especiais e as características dos produtos que foram fabricados nesses horários. Com isso, a identificação e correção das causas especiais tornaram-se



bastante facilitadas. Pelo estudo de capacidade, identificou-se que, além da presença de causas especiais aumentando a variabilidade, a média do processo estava abaixo do valor alvo das especificações, gerando um percentual de 34,89 % abaixo do limite inferior de especificação. Com isso, ficou evidente a necessidade de centralizar o processo, ou seja, agir de forma a aumentar a densidade aparente de  $1,81 \text{ g/cm}^3$  para  $1,88 \text{ g/cm}^3$ . Uma vez resolvido esse problema, o percentual de defeituosos da densidade aparente e, conseqüentemente, da ortogonalidade reduzirão. Com isso, será possível concentrar os recursos na solução dos problemas subseqüentes, ou seja, os próximos produtos fabricados com tipo de massa/bitola que também apresentam desempenho insatisfatório e os próximos itens do gráfico de Pareto. Com os recursos do controle integrado da qualidade foi possível gerenciar toda a informação sobre qualidade da empresa e, dessa forma, priorizar as ações de melhoria.

### **5.6.2 Considerações referentes à implantação do controle integrado da qualidade**

Diversos fatores podem contribuir para o sucesso da implantação do controle integrado da qualidade. A experiência acumulada com as atividades de implantação da metodologia proposta, permitiu identificar alguns desses fatores. De maneira geral, dois fatores facilitam significativamente o processo de implantação, sendo eles: (a) o apoio total da alta gerência, e (b) a certificação das empresas pelas normas ISO 9000 ou QS 9000.

O apoio da gerência deve-se verificar não só na etapa de lançamento do projeto, como também nas reuniões de *follow-up* durante o processo de implantação. Esse apoio é fator determinante na motivação da equipe de implantação, visando fortalecer o comprometimento e coesão da equipe ao longo de todo processo.

A certificação das empresas pelas normas ISO 9000 ou QS 9000 assegura a existência de extensa documentação acerca de procedimentos e especificações, além de definir responsabilidades para todas as atividades que interfiram na qualidade dos produtos e processos. O ambiente ISO ou QS facilita particularmente a etapa de planejamento da implantação.

Na seqüência, são apresentados pontos críticos para o sucesso da implantação para cada uma das etapas apresentadas anteriormente.

### **5.6.2.1. Definição do projeto**

Nesta etapa, é importante definir um setor (ou uma unidade) piloto onde exista motivação para a implantação do controle integrado da qualidade e um grande potencial de obtenção de resultados positivos para a empresa. O sucesso do projeto piloto é de extrema importância, pois a replicação do projeto em outros setores (ou outras unidades) da empresa depende dos resultados obtidos nesse piloto.

A equipe de projeto deve ser multidisciplinar, contemplando profissionais de vários setores da empresa. Sugere-se, no entanto, que o número de integrantes da equipe não ultrapasse oito a dez pessoas, pois as reuniões deixam de ser produtivas e surge a dificuldade de conciliar agendas.

### **5.6.2.2. Planejamento da implantação**

Muitas vezes, a demanda de qualidade do cliente já vem expressa na forma de características de qualidade (variáveis ou atributos quantitativos). Sendo assim, não é necessário o preenchimento da matriz de qualidade e utiliza-se apenas a matriz de processos que cruza características de qualidade do produto com parâmetros e características de processo.

Outro ponto importante é o tamanho das matrizes. Matrizes excessivamente grandes, com muitas relações a serem preenchidas, demandam muito tempo para o preenchimento, podendo desmotivar a equipe de trabalho. Uma forma de lidar com esse problema é utilizar subgrupos focalizados em diferentes processos, realizando o preenchimento das matrizes em paralelo.

Linhas de produtos classificados de acordo com critérios bem definidos facilitam a etapa de identificação dos filtros (ou critérios de classificação) a serem utilizados no controle integrado da qualidade. De maneira similar, a existência de um sistema de custeio eficiente e atualizado facilita a determinação dos custos associados à má qualidade.

### **5.6.2.3. Treinamento**

O treinamento sugerido para o controle integrado da qualidade contempla duas etapas, uma teórica e outra prática, baseada no uso do *software*. Desta forma, sugere-se promover um nivelamento dos participantes quanto à utilização de programas



computacionais. Sugere-se também o treinamento de supervisores ou facilitadores que possam atuar como multiplicadores, transmitindo conhecimentos básicos sobre o controle integrado da qualidade para funcionários no chão-de-fábrica.

#### **5.6.2.4. Implantação efetiva**

Nesta etapa, recomenda-se o acompanhamento atento da rotina do controle integrado da qualidade por parte da equipe de projeto. Aspectos como procedimentos e responsabilidades na coleta e análise dos dados de qualidade podem demandar esclarecimentos.

#### **5.6.2.5. Acompanhamento e consolidação**

Nesta etapa, a equipe de projeto deve estar atenta e receptiva às modificações e melhorias da rotina do controle integrado da qualidade sugeridas por funcionários. Recomenda-se a realização periódica de auditorias no sistema de garantia da qualidade.

### **5.7 Aplicações do controle integrado da qualidade em outros setores industriais**

O controle integrado da qualidade foi implantado em indústrias do setor calçadista e do setor de borrachas. As implantações realizadas em três empresas do setor calçadista foram anteriores ao método proposto nesta tese e serviram de base para a elaboração do controle integrado da qualidade. As empresas do setor calçadista apresentam predominantemente características do tipo atributos e o controle integrado da qualidade foi implantado integrando no mesmo posto de controle apenas atributos. Na verdade, o método implantado no setor calçadista, integrando apenas atributos, é um caso particular do controle integrado da qualidade. O item 5.7.1 apresenta resumidamente o estudo de caso no setor calçadista. Para maiores detalhes ver Wirth, Echeveste, Ribeiro e Caten (1998).

A implantação do controle integrado da qualidade em uma indústria do setor de borrachas foi realizada seguindo as etapas de implantação do método sugeridas nesta tese e integrando no mesmo posto de controle variáveis e atributos. O item 5.7.2 apresenta resumidamente o estudo de caso no setor de borrachas. Para maiores detalhes ver Caten, Ribeiro e Fogliatto (1999).



## **5.7.1 Setor calçadista**

### **5.7.1.1. Definição do escopo e objetivos do projeto**

A empresa em estudo optou pela aplicação do controle integrado de atributos nas oito esteiras (linhas de produção). O cronograma de implantação foi definido em seis meses, com reuniões semanais de acompanhamento.

#### **Definição da equipe de trabalho**

O núcleo-base da equipe da empresa em estudo foi constituído pelo gerente de qualidade, engenheiros e supervisores de produção de cada uma das esteiras. Algumas reuniões contaram com a participação de profissionais do setor de vendas, custos, bem como operadores.

#### **Palestra de lançamento do projeto**

Na empresa em estudo, foram realizadas quatro palestras de lançamento, cada uma com duração de duas horas. As palestras foram assistidas por todos os funcionários da empresa envolvidos no projeto.

### **5.7.1.2. Planejamento da implantação**

#### **Desdobramento da qualidade**

A Figura 5.16 traz uma parte da matriz da qualidade obtida no estudo de caso. Em sua versão integral, a matriz da qualidade apresentava dimensão (6 x 90); ou seja, foram avaliados 6 itens de qualidade demandada e 90 características de qualidade do produto.

## Matriz da Qualidade

		Características de Qualidade					
		Pesos	Espessura	Elasticidade	Umidade do couro	Acabm. Superfície	Tonalidade
Qualidade Demandada	Bom Visual	50	1	1	3	1	6
	Toque	10	3	3	3	9	
	Conforto	30	1	3		3	
	Durabilidade	4	1	3		1	
	Resistência	4	3	1		1	
	Uso	2		3			
Imp Rel		126	192	180	238	300	

Figura 5.16 Exemplo da matriz de desdobramento da qualidade.

## Desdobramento dos processos

Em seguida, foi feito o desdobramento dos processos da linha de produção, ou seja, listou-se todos os processos na ordem em que aparecem na linha de produção. A Figura 5.17 apresenta uma matriz resumida apenas com os macro-processos da empresa. Em sua versão integral, a matriz de processos apresentava dimensão (115 x 25), ou seja, foram avaliados 115 parâmetros e características de processo e 25 características de qualidade do produto.

## Matriz de Processos

	Características de Qualidade					Prior.
	126	192	180	238	300	
Desdobramento dos Processos	Corte	9	6			2286
	Chanfração	3	3	1		1134
	Costura		3		1	814
	Pré-montagem				1	300
	Montagem			3	1	840
	Acabamentos				9	3942

Figura 5.17 Exemplo da matriz de desdobramento de processos.

## Direcionamento das ações

A Figura 5.18 apresenta a matriz de ações resumida apenas com os macro-processos da empresa. Em sua versão integral, a matriz de ações apresentava dimensão (115 x 5), ou seja, foram avaliados 115 parâmetros e características de processo e 5 possíveis ações a serem implantadas.

### Matriz das Ações

		Ações Possíveis					
		Treinamento	Com. Estatíst.	Fornecedores	Proj. de Exp.	ISO 9000	
Desdobramento dos Processos	Prior.						
	Corte	2286	1	3	9	3	1
	Chanfração	1134	1	3			1
	Costura	814	1	3			1
	Pré-montagem	300		3			1
	Montagem	840		3		3	1
	Acabamentos	3942		3			1

Figura 5.18 Exemplo da matriz de ações possíveis.

## Identificação dos postos de controle e parâmetros e características de qualidade do processo a serem monitoradas em cada posto

Conhecendo-se as características de qualidade (atributos) críticas e onde elas são construídas, ou seja, sua posição na linha de produção, definiu-se a localização dos postos de controle (ver Tabela 5.9) e atributos a serem monitorados em cada posto (ver exemplo na Tabela 5.10).

Tabela 5.9 Localização dos postos de controle.

Posto	Localização
1	após corte
2	após chanfração
3-	meio da costura
4-	fim da costura
5	pré-montagem (aviamentos e pré-fabricado)
6	montagem: antes da colagem da sola e após a retirada da forma
7	fim da montagem



Tabela 5.10 Lista de defeitos para o posto 1 (após o corte).

<b>Parâmetros e características dos processos</b>
Debrum com riscos abertos, bernes
Peças de enfeite com espessura errada
Laterais com riscos abertos, bernes
Laterais com a flor solta
Laterais cortadas no sentido errado
Laterais com riscos fechados, carrapato
Traseiros com riscos abertos, berne
Traseiros com riscos fechados, carrapato
Peças de traseiro faltando pedaços
Traseiro com a espessura errada
Gáspea/espelho com carrapatos
Gáspea/espelho cortada da barriga
Gáspea/espelho com a flor solta
Gáspea/espelho com sent. errado da elast.
Gáspea/espelho faltando pedaço
Gáspea/espelho com a espessura errada
Gáspea/espelho peluda no carnal
Tonalidade cores dif. entre as peças do par
Porosidade dif. entre as peças do par
Estampas dif. entre as peças do par
Camurças dif. entre as peças do par
Forro avesso com furos/faltando pedaços
Forro avesso com espessura errada
Peças faltando no talão
Pintura do afio man/ cabedal mal pint

### Definição de critérios de classificação dos produtos

A Tabela 5.11 apresenta a descrição dos critérios de classificação definidos para o estudo de caso.

Tabela 5.11 Descrição dos critérios de classificação definidos para o estudo de caso.

<b>Crítérios de classificação (filtros)</b>	<b>Tipo de critério</b>
Esteira	Controle em paralelo
Modelo	Especificações
Classe	Especificações
Inspetor	Somente filtro

### Descrição dos parâmetros e características de qualidade dos processos

A Tabela 5.12 apresenta a descrição dos parâmetros e características do processo (atributos) monitoradas no posto 1 (após o corte) do estudo de caso.

Tabela 5.12 Descrição dos parâmetros e características dos processos do posto 1 do estudo de caso.

	Processo (0) /Característica (1)	Tipo de Variável	Unidade de medição	Alvo (Valor Nominal)	Especificação Superior	Retrabalho/Reclas./Refugo	Proporção do custo (%)
<b>Parâmetros e características dos processos</b>							
Debrum com riscos abertos, bernes	1	Me	un	0	0,5	Rf	0,02
Peças de enfeite com espessura errada	1	Me	un	0	0,6	Rf	0,03
Laterais com riscos abertos, bernes	1	Me	un	0	0,5	Rf	0,02
Laterais com a flor solta	1	Me	un	0	0,7	Rf	0,03
Laterais cortadas no sentido errado	1	Me	un	0	0,5	Rf	0,03
Laterais com riscos fechados, carrapato	1	Me	un	0	0,4	Rf	0,01
Traseiros com riscos abertos, berne	1	Me	un	0	0,3	Rf	0,02
Traseiros com riscos fechados, carrapato	1	Me	un	0	0,5	Rf	0,01
Peças de traseiro faltando pedaços	1	Me	un	0	0,3	Rf	0,02
Traseiro com a espessura errada	1	Me	un	0	0,4	Rf	0,01
Gáspea/espelho com carrapatos	1	Me	un	0	0,2	Rf	0,04
Gáspea/espelho cortada da barriga	1	Me	un	0	0,3	Rf	0,04
Gáspea/espelho com a flor solta	1	Me	un	0	0,2	Rf	0,03
Gáspea/espelho com sent. errado da elast.	1	Me	un	0	0,5	Rf	0,05
Gáspea/espelho faltando pedaço	1	Me	un	0	0,5	Rf	0,05
Gáspea/espelho com a espessura errada	1	Me	un	0	0,6	Rf	0,03
Gáspea/espelho peluda no carnal	1	Me	un	0	0,3	Rf	0,02
Tonalidade cores dif. entre as peças do par	1	Me	un	0	0,6	Rf	0,07
Porosidade dif. entre as peças do par	1	Me	un	0	0,5	Rf	0,06
Estampas dif. entre as peças do par	1	Me	un	0	0,3	Rf	0,07
Camurças dif. entre as peças do par	1	Me	un	0	0,2	Rf	0,07
Forro avesso com furos/faltando pedaços	1	Me	un	0	0,4	Rf	0,02
Forro avesso com espessura errada	1	Me	un	0	0,3	Rf	0,01
Peças faltando no talão	1	Me	un	0	0,4	Rf	0,06
Pintura do afio man/cabedal mal pint	1	Me	un	0	0,5	Rf	0,04

### Definição do procedimento de coleta de dados

A Tabela 5.13 apresenta a descrição do procedimento de coleta de dados do posto 1 (após o corte) do estudo de caso.



Tabela 5.13 Descrição do procedimento de coleta de dados do posto 1 do estudo de caso.

	Variável/atributo	Tipo de carta	Tamanho de amostra	Frequência	Registro dos dados	Sistema de medição	Sistema de medição
<b>Parâmetros e características do processo (atributos)</b>							
Debrum com riscos abertos, bernes	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Peças de enfeite com espessura errada	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Laterais com riscos abertos, bernes	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Laterais com a flor solta	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Laterais cortadas no sentido errado	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Laterais com riscos fechados, carrapato	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Traseiros com riscos abertos, berne	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Traseiros com riscos fechados, carrapato	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Peças de traseiro faltando pedaços	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Traseiro com a espessura errada	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Gáspea/espelho com carrapatos	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Gáspea/espelho cortada da barriga	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Gáspea/espelho com a flor solta	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Gáspea/espelho com sent. errado da elast.	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Gáspea/espelho faltando pedaço	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Gáspea/espelho com a espessura errada	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Gáspea/espelho peluda no carnal	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Tonalidade cores dif. entre as peças do par	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Porosidade dif. entre as peças do par	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Estampas dif. entre as peças do par	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Camurças dif. entre as peças do par	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Forro avesso com furos/faltando pedaços	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Forro avesso com espessura errada	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Peças faltando no talão	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok
Pintura do afio man/cabedal mal pint	A	u	10	2 horas	planilha	visual	Ok

### Avaliação do sistema de medição

O resultado da avaliação dos sistemas de medição no estudo de caso é apresentado na última coluna da Tabela 5.13.

### Definição de responsabilidades

A Tabela 5.14 apresenta a definição de atribuições e responsabilidades do posto 1 (após o corte) do estudo de caso.



Tabela 5.14 Definição de responsabilidades no posto 1 do estudo de caso.

	Responsável pela coleta	Responsável pelo monitoramento	Responsável pela ação corretiva	Responsável pelo cálculo dos Limites de Controle	Responsável pelo est. de capacidade
<b>Parâmetros e características do processo (atributos)</b>					
Debrum com riscos abertos, bernes	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Peças de enfeite com espessura errada	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Laterais com riscos abertos, bernes	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Laterais com a flor solta	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Laterais cortadas no sentido errado	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Laterais com riscos fechados, carrapato	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Traseiros com riscos abertos, berne	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Traseiros com riscos fechados, carrapato	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Peças de traseiro faltando pedaços	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Traseiro com a espessura errada	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Gáspea/espelho com carrapatos	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Gáspea/espelho cortada da barriga	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Gáspea/espelho com a flor solta	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Gáspea/espelho com sent. errado da elast.	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Gáspea/espelho faltando pedaço	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Gáspea/espelho com a espessura errada	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Gáspea/espelho peluda no carnal	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Tonalidade cores dif. entre as peças do par	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Porosidade dif. entre as peças do par	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Estampas dif. entre as peças do par	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Camurças dif. entre as peças do par	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Forro avesso com furos/faltando pedaços	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Forro avesso com espessura errada	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Peças faltando no talão	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Pintura do afio man/cabedal mal pint	operador	operador	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo

### Definição da documentação necessária

Nesta etapa, foram elaboradas as planilhas de coleta de dados a serem utilizadas em cada posto de controle. As planilhas de coleta de dados contêm todas os atributos monitorados em cada posto de trabalho e informações sobre os critérios de classificação dos dados coletados. A Figura 5.19 apresenta a planilha de coleta de dados do posto 1 (após o corte) do estudo de caso.





#### 5.7.1.4. Implantação efetiva

Nesta etapa teve início a coleta de dados a serem utilizados no controle integrado de atributos. Num primeiro momento, os dados coletados foram plotados em cartas sem limites de controle. Na sequência, os limites de controle para as cartas integradas foram calculados e acrescentados às cartas de controle.

#### 5.7.1.5. Acompanhamento e consolidação

O controle integrado de atributos monitora em uma única carta do posto de controle: a média ponderada de defeitos por unidade. Essa carta aglutina todos os defeitos que podem ser construídos inadvertidamente em um posto de controle.

Trata-se de uma média ponderada por unidade, pois é atribuído um peso a cada defeito, considerando-se os resultados obtidos na matriz da qualidade. Ou seja, a ponderação é feita a partir da voz do cliente, garantindo uma orientação correta para as atividades de controle da qualidade. Além da importância do defeito, que leva em conta a voz do cliente, a ponderação também pode incorporar os custos de correção e retrabalho associados a cada defeito.

Inicialmente calculou-se para cada amostra a média ponderada de defeitos por unidade:

$$\text{eq. 5.1} \quad u_j = \frac{SP_j}{n} = \frac{\sum \text{defeito } j,i \times \text{peso } i}{\text{média pesos} \times n}$$

onde:  $u_j$ : média ponderada de defeitos por unidade na amostra  $j$ ;

$SP_j$ : soma ponderada de defeitos na amostra  $j$ ;

$n$ : tamanho da amostra;

$\text{defeitos } j, i$ : número de vezes que o defeito  $i$  apareceu na amostra  $j$ ;

$\text{peso } i$ : importância relativa do defeito  $i$  da matriz da qualidade;

$\text{médias dos pesos}$ : média dos pesos atribuídos aos defeitos  $i$ .

Na sequência, calculou-se a média e desvio-padrão das médias ponderadas por unidade.



$$eq. 5.2 \quad \bar{u} = \frac{\sum_{j=1}^J u_j}{J}$$

onde:  $\bar{u}$ : média das médias ponderada de defeitos por unidade;  
 $J$ : número de amostras.

$$eq. 5.3 \quad \sigma_u = \sqrt{\bar{u}/n}$$

onde:  $\sigma_u$ : desvio-padrão das médias ponderada de defeitos por unidade;  
 $\bar{u}$ : média das médias ponderada de defeitos por unidade;  
 $n$ : tamanho da amostra.

Os limites de controle foram calculados usando o formulário tradicional, ou seja:

$$eq. 5.4 \quad LCS = \bar{u} + 3\sigma_u$$

$$eq. 5.5 \quad LCI = \bar{u} - 3\sigma_u$$

A Figura 5.20 apresenta uma carta de média ponderada por unidade do posto 1.

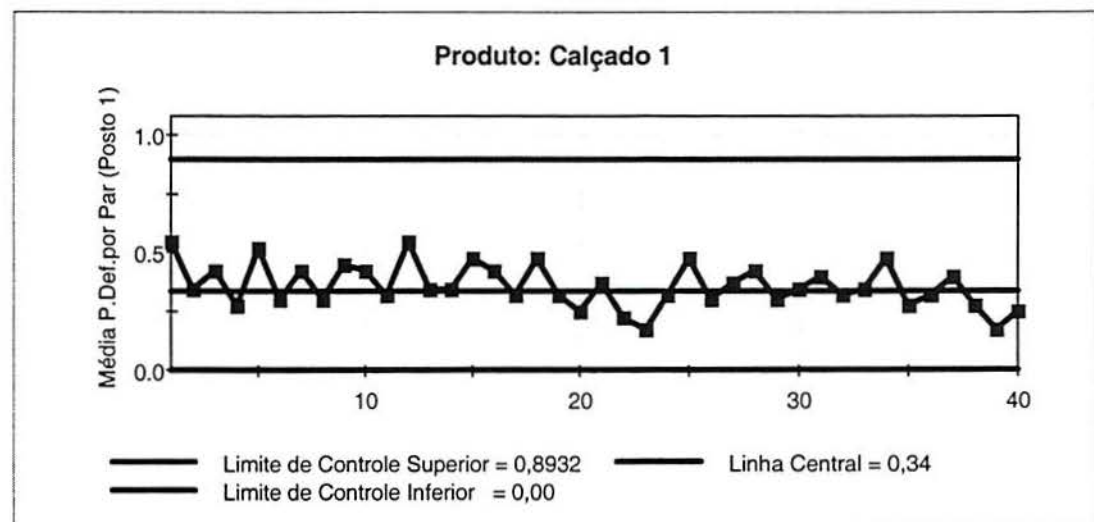


Figura 5.20 Carta da média ponderada de defeitos por unidade do posto 1.

### Gráfico de Pareto da soma acumulada de defeitos por posto

Simultaneamente ao monitoramento do número médio de defeitos por unidade, os defeitos de vários tipos que aparecem foram acumulados em um gráfico de Pareto (ver Figura 5.21). Sempre que apareceu um sinal fora do controle, ou seja, uma média ponderada de defeitos por unidade muito alta, o gráfico de Pareto foi consultado.

A Figura 5.21 apresenta o gráfico de Pareto da soma ponderada de defeitos acumulada para o posto 1.

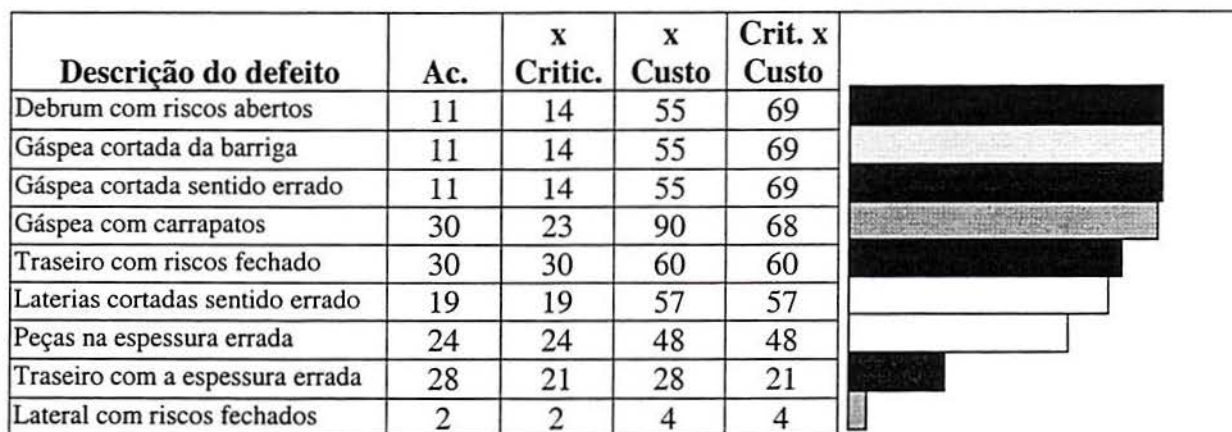


Figura 5.21 Gráfico de Pareto da soma ponderada de defeitos acumulada para o posto 1.

O gráfico de Pareto revelou quais os defeitos que estão contribuindo com maior força para o sinal fora de controle. Assim, o operador do posto em questão pôde dirigir seus esforços na direção certa, atacando inicialmente os problemas principais.

### Carta global da média ponderada de defeitos por unidade

Da mesma forma que foi feito para cada posto de controle, também foi monitorada a média ponderada de defeitos em toda a linha de produção, conforme aparece na Figura 5.22. Isso permitiu ao gerente da linha ter uma visão geral dos vários postos de controle.

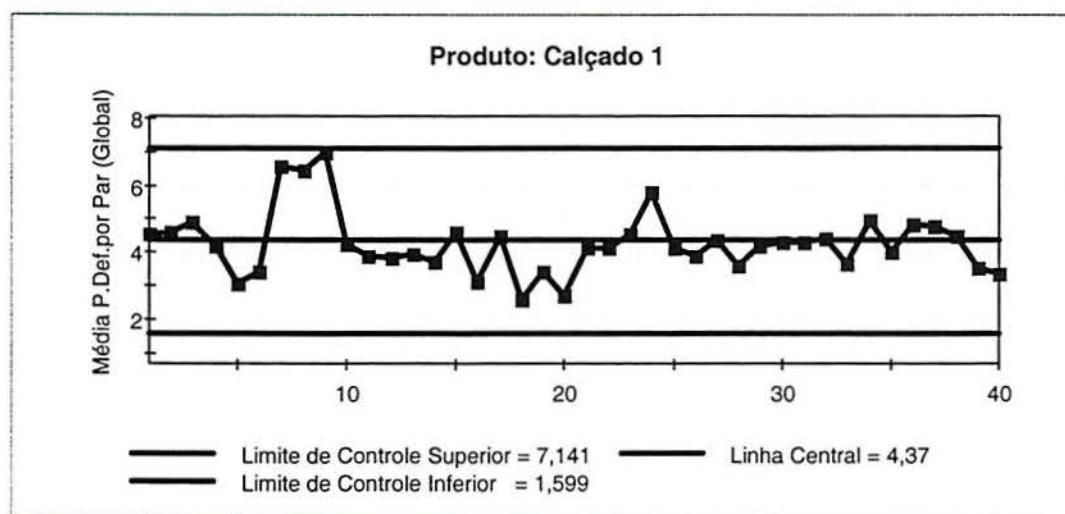


Figura 5.22 Carta global da média ponderada de defeitos por unidade.

### Gráfico de Pareto da soma ponderada de defeitos global

Por outro lado, quando apareceu um sinal fora de controle, o gerente atuou no local certo, pois teve acesso ao gráfico de Pareto da soma ponderada de defeitos acumulada em toda a linha de produção.

Mesmo quando não há pontos fora do controle, semanalmente ou mensalmente, o gerente pôde analisar o gráfico de Pareto e identificar os pontos de melhoria. A Figura 5.23 apresenta o gráfico de Pareto da soma ponderada de defeitos acumulada global.

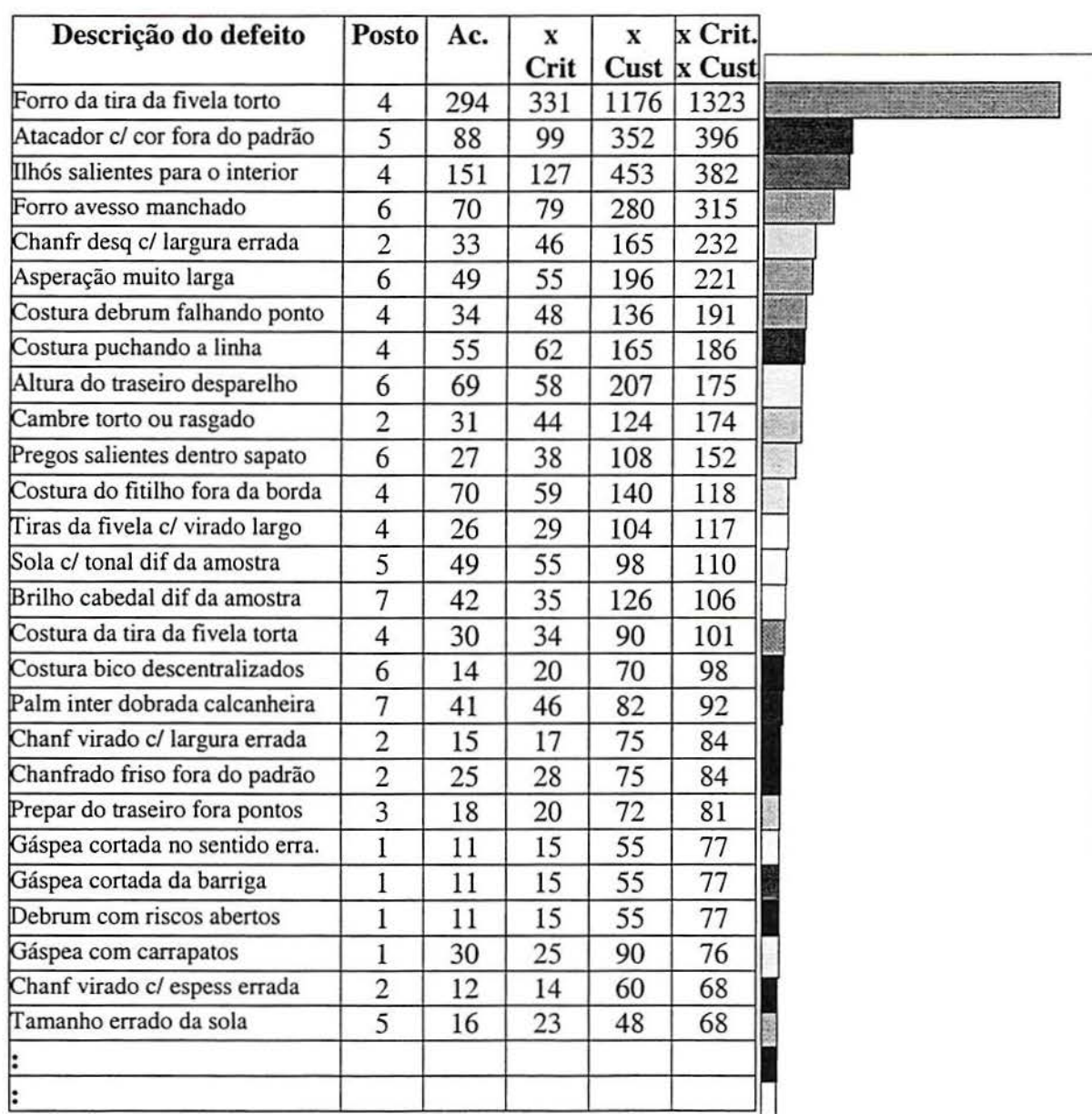


Figura 5.23 Gráfico de Pareto da soma ponderada de defeitos acumulada global.



## **5.7.2 Setor de borrachas**

### **5.7.2.1. Definição do escopo e objetivos do projeto**

A empresa em estudo optou pela aplicação do CIQ em toda sua área fabril, contemplando cinco linhas de produtos: pré-moldado, camelback, massas comerciais, massas em manta e adesivos. O cronograma de implantação foi definido em oito meses, com reuniões quinzenais de acompanhamento.

#### **Definição da equipe de trabalho**

O núcleo-base da equipe da empresa em estudo foi constituído pelo gerente de qualidade, chefe do departamento de qualidade, gerente de produção de cada uma das plantas fabris e pelo engenheiro de processo. Algumas reuniões contaram com a participação de profissionais do setor de marketing, vendas, atendimento ao consumidor e custos, bem como de supervisores de produção e operadores de máquina.

#### **Palestra de lançamento do projeto**

Na empresa em estudo, foram realizadas duas palestras de lançamento, cada uma com duração de duas horas. As palestras foram assistidas por todos os funcionários da empresa envolvidos no projeto.

### **5.7.2.2. Planejamento da implantação**

#### **Desdobramento da qualidade**

A Figura 5.24 traz uma parte da matriz da qualidade obtida no estudo de caso. Em sua versão integral, a matriz da qualidade apresentava dimensão (30 × 79); ou seja, foram avaliados 30 itens de qualidade demandada e 79 características de qualidade do produto. A partir do preenchimento da matriz, foi possível quantificar e identificar com objetividade as características de qualidade do produto críticas, fortemente relacionadas com a satisfação dos clientes.

Qualidade Demandada	Características de Qualidade											
	Pesos ( $W_i$ )	Tensão de Rasgamento	Falta de vulcanização	Falhas no desenho	Rachadura nos gomos	Tensão de Ruptura	Resistência à abrasão	Resiliência	Espessura	Largura	Quantidade de cola	
	Desempenho	50	9	9	3	9	6	9	6	3	1	6
	Acabamento	20	1	9	9	9						3
	Facilidade de aplicação	5	3	6		1			1	1		
	Aderência na aplicação	10										9
	Dimensional	10								9	9	
Índice da Caract. Qual ( $ICQ_j$ )		485	660	330	635	300	450	305	245	140	450	

Figura 5.24 Matriz da qualidade obtida no estudo de caso (resumida).

### Desdobramento dos processos

A Figura 5.25 apresenta uma parte da matriz dos processos obtida no estudo de caso. As colunas da matriz apresentam as características da qualidade avaliadas na matriz da qualidade; os parâmetros e características dos processos, nas linhas da matriz, foram cruzados com estas características de qualidade. Em sua versão integral, a matriz dos processos apresentava dimensão ( $104 \times 79$ ); ou seja, foram avaliados 104 parâmetros e características de processo e 79 características de qualidade do produto.

		Características de Qualidade														
		Tensão de rasgamento	Falta de vulcanização	Falhas no desenho	Rachadura nos gom	Tensão de Ruptura	Resistência à abrasão	Resiliência	Espessura	Largura	Quantidade de cola	Índice de Qualidade	Capacidade	Conhecimento	Índice de Priorização	
		485	660	330	635	300	450	305	245	140	450	IQ <sub>Pi</sub>	Cp <sub>Ki</sub>	Ci	IPP <sub>i</sub>	
Processos desdobrados	Índice da C.Q. (ICQ <sub>i</sub> )															
	Extrusão	Temperatura das Zonas	9	6			9	6	9			3	17820	1,67	0,7	15244
	Extrusão	Pressão do cabeçote	3	1				3	1	1	3		4435	1	0,2	22175
	Extrusão	Temperatura da massa	6	9	6		9	6	6				18060	0,63	0,8	35833
	Extrusão	Peso / Metro	6	6			3	3	3	9	9	1	13950	0,5	0,6	46500
	Extrusão	Temperatura de embobinamento	6	9	3	1	6	6	6				16805	0,77	0,9	24250
	Extrusão	Presença de caroços	1	6	3		6	6	6				11765	0,67	0,9	19511
	Vulcanização	Temperatura	3	9	3	3	6	3		9	6		16485	1,13	0,95	15356
	Vulcanização	Pressão	3	9	3	6	6	3		6	3		17235	1	0,8	21544
	Vulcanização	Tempo	3	9	6		6	3				3	13875	1	0,8	17344
	Vulcanização	Ciclo de fech/desag. agem	6	3			6	6		1	3		10055	1	0,65	15469
	Vulcanização	Tempo de resfr. da banda	6	3		3	6						9495	1	0,65	14608
	Vulcanização	Espessura total	9				6			9	3		8790	1,23	0,9	7940
	Vulcanização	Espessura da base	9				6			9	3		8790	1,23	0,9	7940
	Vulcanização	Largura	3		3		6			6	9	3	8325	1	0,9	9250
Vulcanização	Profundidade do incavo	6		6	3	9			6			10965	1,67	1	6566	
Vulcanização	Dureza	6		6	6	6	3					11850	1,4	0,95	8910	

Figura 5.25 Matriz dos processos obtida no estudo de caso (resumida).

Para compor um índice de priorização ( $IPP_i$ ) para os parâmetros dos processos, foram necessárias estimativas (i) do índice de capacidade dos processos em estudo e (ii) do grau de conhecimento da equipe técnica quanto aos parâmetros listados.

A Figura 5.25 apresenta uma parte dos índices de priorização para os parâmetros e características dos processos analisados no estudo de caso.

### Direcionamento das ações

A Figura 5.26 apresenta uma parte da matriz das ações de melhoria para os parâmetros dos processos do estudo de caso.



		Ações possíveis									
Macro-processo	Parâmetros do processo	IPPI - Índice de Priorização	Controle integrado	Treinamento	Desenv. de fornecedores	Projeto de experimentos	Estudos ergonômicos	Aquisição de equipamentos	Certificação ISO 9000	Definição de procedimentos	Análise do sistema de medição
Processos desdobrados	Extrusão	Temperatura das Zonas	15244	3	9		9	9	1	6	9
	Extrusão	Pressão do cabeçote	22175	3	3		6		1	3	3
	Extrusão	Temperatura da massa	35833	6			9		9	1	
	Extrusão	Peso / Metro	46500	3		3	9	9	1	9	
	Extrusão	Temperatura de embobinamento	24250	6		3	9	6	9	1	9
	Extrusão	Presença de caroços	19511	9		3			1	9	3
	Vulcanização	Temperatura	15356	6	3		9	6	9	1	6
	Vulcanização	Pressão	21544	6			6		1	3	6
	Vulcanização	Tempo	17344	3	3		6		1		
	Vulcanização	Ciclo de fech/degasagem	15469	3	6				1		
	Vulcanização	Tempo de resfr da banda	14608	3			9		1		6
	Vulcanização	Espessura total	7940	9				3	6	1	3
	Vulcanização	Espessura da base	7940	9				3	6	1	3
	Vulcanização	Largura	7317	3					1	3	3
	Vulcanização	Profundidade do incavo	6566			6		9	9	1	9
	Vulcanização	Dureza	8910	9	6	6			6	1	3

Figura 5.26 Matriz de processos referente ao direcionamento das ações de melhoria para os parâmetros dos processos no estudo de caso (resumida).

### Identificação dos postos de controle e parâmetros e características de qualidade do processo a serem monitoradas em cada posto

A Tabela 5.15 apresenta os postos de controle definidos para o estudo de caso. Na Tabela 5.16, são apresentados os parâmetros e características de qualidade dos processos monitorados no posto vulcanização, definido como oitavo posto de controle no estudo de caso.

Tabela 5.15 Descrição dos postos de controle no estudo de caso.

Posto	Descrição
1	Recepção de MP
2	Mastigação
3	Pré-mistura
4	Mistura batch acelerador
5	Mistura batch enxofre
6	Mistura final
7	Extrusão
8	Vulcanização
9	Raspagem
10	Calandragem

Tabela 5.16 Parâmetros e características de qualidade dos processos alocados no posto vulcanização (posto 8).

Parâmetros e características dos processos
1. Pressão
2. Temperatura
3. Percentual de rebarba
4. Espessura total
5. Espessura da base
6. Largura
7. Dureza
8. Falta de vulcanização
9. Falta de massa
10. Falhas no desenho sucata
11. Falhas no desenho reclassificado
12. Falhas de rebarbagem
13. Rachadura nos gomos
14. Presença de impurezas

### Definição de critérios de classificação dos produtos

A Tabela 5.17 apresenta a descrição dos critérios de classificação definidos para o estudo de caso.

Tabela 5.17 Descrição dos critérios de classificação definidos para o estudo de caso.

Critérios de classificação (filtros)	Tipo de critério
Tipo de produto	Especificações e custo
Código de massa	Especificações
Desenho	Especificações
Dimensional	Especificações
Equipamento	Controle em paralelo
Turno	Somente filtro

## Descrição dos parâmetros e características de qualidade dos processos

A Tabela 5.18 apresenta a descrição dos parâmetros dos processos e características de qualidade (variáveis e atributos) monitoradas no posto vulcanização (posto 8) do estudo de caso.

Tabela 5.18 Descrição dos parâmetros e características dos processos do posto vulcanização no estudo de caso.

	Processo (0) /Característica (1)	Tipo de Variável	Unidade de medição	Especificação Inferior	Alvo (Valor Nominal)	Especificação Superior	Retrabalho/Reclas./Refugo	Proporção do custo (%)
<b>Parâmetros e características dos processos ( variáveis e atributos)</b>								
Pressão	0	NM	kgf/cm <sup>2</sup>	180	195	210	Rf	90,0
Temperatura	0	NM	°C	160	162,5	165	Rf	90,0
Percentual de rebarba	0	NM	%	0,7	1	2,5	Rf	90,0
Espessura total	1	NM	mm	-0,5 %	-	0,5 %	Rc.	20,0
Espessura da base	1	NM	mm	-0,5 %	-	0,5 %	Rc.	20,0
Largura	1	NM	mm	-1 %	0	1 %	Rc.	20,0
Dureza	1	NM	sh A	61	63	69	Rf	90,0
Falta de vulcanização	1	Me	%	-	0	0,001	Rf	90,0
Falta de massa	1	Me	%	-	0	0,001	Rf	90,0
Falhas no desenho sucata	1	Me	%	-	0	0,001	Rf	90,0
Falhas no desenho reclassificado	1	Me	%	-	0	0,001	Rc.	20,0
Falhas de rebarbagem	1	Me	%	-	0	0,001	Rc.	20,0
Rachadura nos gomos	1	Me	%	-	0	0,001	Rf.	90,0
Presença de impurezas	1	Me	%	-	0	0,001	Rf	90,0

## Definição do procedimento de coleta de dados

A Tabela 5.19 apresenta a descrição do procedimento de coleta de dados do posto vulcanização (posto 8), no estudo de caso.



Tabela 5.19 Descrição do procedimento de coleta de dados do posto vulcanização no estudo de caso.

	Variável/atributo	Tipo de carta	Nº de cartas	Tamanho de amostra	Frequência	Registro dos dados	Sistema de medição	Sistema de medição
<b>Parâmetros e características do processo (variáveis e atributos)</b>								
Pressão	V	M	1	6	2/turno	computador	CLP	Ok
Temperatura	V	M	1	6	2/turno	computador	CLP	Ok
Percentual de rebarba	A	p	1	100%	1/turno	planilha	balança	Ok
Espessura total	V	Z	2	1	1/lote	planilha	espessímetro	NOk
Espessura da base	V	Z	2	1	1/lote	planilha	espessímetro	NOk
Largura	V	Z	1	1	1/lote	planilha	fita métrica	Ok
Dureza	V	Z	2	5	1/lote	planilha	durômetro	Ok
Falta de vulcanização	A	p	1	100%	1/turno	planilha	balança	Ok
Falta de massa	A	p	1	100%	1/turno	planilha	balança	Ok
Falhas no desenho sucata	A	p	1	100%	1/turno	planilha	balança	Ok
Falhas no desenho reclassificado	A	p	1	100%	1/turno	planilha	balança	Ok
Falhas de rebarbagem	A	p	1	100%	1/turno	planilha	balança	Ok
Rachadura nos gomos	A	p	1	100%	1/turno	planilha	balança	Ok
Presença de impurezas	A	p	1	1	1/turno	planilha	balança	Ok

### Avaliação do sistema de medição

O resultado da avaliação dos sistemas de medição no estudo de caso é apresentado na última coluna da Tabela 5.19.

### Definição de responsabilidades

A Tabela 5.20 apresenta a definição de atribuições e responsabilidades do posto vulcanização (posto 8) no estudo de caso. Como pode ser visto na Tabela 5.20, o monitoramento é feito por supervisores e os cálculos de limites de controle e estudos de capacidade são feitos por engenheiros de processo.

Tabela 5.20 Definição de responsabilidades no posto vulcanização do estudo de caso.

	Responsável pela coleta	Responsável pela digitação	Responsável pelo monitoramento	Responsável pela ação corretiva	Responsável pelo cálculo dos Limites de Controle	Responsável pelo est. de capacidade
<b>Parâmetros e características do processo ( variáveis e atributos)</b>						
Pressão	op. prensa	supervisor	supervisor	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Temperatura	op. prensa	supervisor	supervisor	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Percentual de rebarba	op. Prensa	supervisor	supervisor	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Espessura total	op. Prensa	supervisor	supervisor	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Espessura da base	op. Prensa	supervisor	supervisor	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Largura	op. prensa	supervisor	supervisor	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Dureza	or. prensa	supervisor	supervisor	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Falta de vulcanização	op. prensa	supervisor	supervisor	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Falta de massa	op. prensa	supervisor	supervisor	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Falhas no desenho sucata	op. prensa	supervisor	supervisor	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Falhas no desenho reclassific.	op. prensa	supervisor	supervisor	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Falhas de rebarbagem	op. prensa	supervisor	supervisor	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Rachadura nos gomos	op. prensa	supervisor	supervisor	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo
Presença de impurezas	op. prensa	supervisor	supervisor	sup/GAQ	eng. processo	eng. processo

### Definição da documentação necessária

Nesta etapa, foram elaboradas as planilhas de coleta de dados a serem utilizadas em cada posto de controle. As planilhas de coleta de dados contêm todas as variáveis e atributos monitorados em cada posto de trabalho e informações sobre os critérios de classificação dos dados coletados. A Figura 5.27 apresenta a planilha de coleta de dados do posto vulcanização (posto 8) do estudo de caso.

Fábrica:	( ) I	( ) II
Posto:		
Equipamento:		

Data:								
Hora:								
Turno:								
Código								
Lote								
Tipo de produto								
Desenho/largura								
Código da massa								
Tempo (min)								
Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )								
Temperatura °C (mín-máx)								
Peso da rebarba (kg)								
Peso da banda rebarbada (inteira) kg								
Espessura total (mm)								
Espessura da base (mm)								
Largura (mm)								
Dureza (shore A)								
Falta de vulcanização (nº de bandas)								
Falta de massa (nº de bandas)								
Falhas no desenho recias. (nº de bandas)								
Falhas de rebarbagem (nº de bandas)								
Rachadura nos gomos (nº de bandas)								
Presença de impurezas (nº de bandas)								
Falhas no desenho sucata (kg)								
Produção (nº de bandas)								

Figura 5.27 Planilha de coleta de dados do posto vulcanização do estudo de caso.

### 5.7.2.3. Treinamento em controle integrado de processos

Os gerentes e diretores receberam treinamento relacionado à análise das cartas de controle e gráficos de Pareto, pois estes profissionais utilizam essa análise como subsídio à tomada de decisões.

Os supervisores e engenheiros receberam treinamento integral em Controle Estatístico de Processos, pois estes profissionais definem tamanhos de amostra, frequência de amostragem, limites de controle, etc.

Os operadores receberam treinamento no preenchimento de planilhas e na análise das cartas de controle resultantes, com o objetivo de detectar a presença de causas especiais.

### 5.7.2.4. Implantação efetiva

Nesta etapa teve início a coleta de dados a serem utilizados no CIQ e a utilização prática do *software* dedicado ao CIQ, sendo definida a frequência ideal de entrada de dados registrados nas planilhas no computador. Num primeiro momento, os dados coletados foram plotados em cartas sem limites de controle. Na sequência, os limites de controle para as cartas



individuais foram calculados e acrescentados às cartas de controle. Os limites de controle das cartas integradas só foram calculados após terem sido coletados dados referentes a todas as variáveis e atributos do posto de controle em questão.

#### **5.7.2.5. Acompanhamento e consolidação**

Nesta fase, analisou-se a estabilidade dos processos e adotou-se procedimentos de identificação e eliminação de causas especiais. Analisou-se também a capacidade dos processos e implantou-se ações de grupos de melhoria da qualidade . A sistemática de ação do sistema foi reavaliada e planejou-se o aprimoramento do sistema.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1. Conclusões

Esta tese apresentou um procedimento inovador para o controle e a garantia da qualidade em situações onde existem muitas variáveis e atributos a serem monitorados. O procedimento, chamado de controle integrado da qualidade, tem como elementos fundamentais um banco de dados integrado e as cartas integradas, que devem ser gerenciados através de um *software* desenvolvido para esse fim.

O banco de dados é construído de modo a integrar todos os dados referentes aos parâmetros do processo e características de qualidade medidas ao longo dos processos, acompanhados de informações referentes a turnos, máquinas, etc., que irão permitir a completa recuperação das informações filtradas de acordo com diversos critérios.

A operacionalização do controle integrado da qualidade é feita a partir da definição de alguns postos de controle ao longo da linha de produção, e o monitoramento da qualidade em cada posto de controle é feito utilizando cartas integradas, que agregam diversas variáveis e atributos.

A chave para o uso das cartas integradas é a escolha de um parâmetro comum, no caso o percentual de defeituosos, que pode ser estimado a partir do estudo de variáveis ou atributos. Esse procedimento permite integrar variáveis e atributos em uma única carta de controle, facilitando a análise e, ao mesmo tempo, aumentando o poder estatístico das inferências.

Enquanto o processo se comporta naturalmente, a prioridade é a produção, e o monitoramento continua sendo feito com base nas cartas integradas usadas em cada

posto. Quando aparece um sinal estatístico de causas especiais, então a análise é aprofundada com o suporte de gráficos de Pareto e das cartas de controles individuais para as variáveis e atributos de interesse.

O gráfico de Pareto hierarquiza as variáveis e atributos que estão contribuindo mais acentuadamente para o percentual de defeituosos global. As cartas individuais, utilizadas seletivamente e apenas conforme a indicação do Pareto, auxiliam no diagnóstico e solução do problema.

Resumindo, as principais vantagens do procedimento proposto são as seguintes: (a) o banco de dados integrado, que possibilita o total acesso às informações de qualidade; (b) as cartas integradas, que facilitam o controle diário; (c) a base estatística, que fornece o suporte apropriado para a tomada de decisão; e (d) o forte apelo gerencial da estratégia proposta, que disponibiliza a cada ciclo de amostragem uma visão completa da qualidade e dos custos da má qualidade nos postos de controle e na linha de produção como um todo.

Essa tese também apresentou uma abordagem sistemática para a implantação com sucesso do controle integrado da qualidade. As principais etapas da implantação são: a definição do projeto, o planejamento da implantação, o treinamento, a implantação efetiva e, por último, o acompanhamento e consolidação.

A etapa de definição do projeto envolve a definição dos objetivos, cronograma, equipe de trabalho e lançamento do projeto.

A etapa de planejamento da implantação envolve o desdobramento da qualidade, o desdobramento dos processos, o direcionamento das ações, a identificação dos postos de controle e alocação dos parâmetros e características de processo (variáveis ou atributos) monitoradas em cada posto, a definição dos critérios de classificação (filtros), o detalhamento dos parâmetros e características de processo (variáveis ou atributos), a definição do procedimento de coleta de dados, a avaliação do sistema de medição, a definição de responsabilidades e por último a definição da documentação necessária.

A etapa de treinamento envolve o treinamento de gerentes, supervisores, operadores em diferentes níveis de acordo com suas atribuições no controle integrado da qualidade.



A etapa de implantação efetiva envolve o início do monitoramento e cálculo dos limites de controle.

A etapa de acompanhamento e consolidação envolve a identificação de possíveis melhorias nos processos produtivos e no sistema de garantia da qualidade.

No estudo de caso realizado em uma empresa cerâmica, ficou evidente a vantagem de usar o controle integrado da qualidade, uma vez que o método proposto disponibiliza informações suficientes para identificar, priorizar e rastrear a origem dos problemas, permitindo a solução dos mesmos em tempos bastante reduzidos.

O controle integrado da qualidade e a sequência de etapas sugeridas para a sua implementação propostos nessa tese podem auxiliar as empresas a garantirem a qualidade de seus processos produtivos e com isso aumentarem a qualidade e confiabilidade dos seus produtos manufaturados, assim como, reduzirem os custos da má qualidade do produto manufaturado.

## **6.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Sugere-se para trabalhos futuros, que o Controle Integrado da Qualidade seja capaz de identificar a estrutura de correlação entre as variáveis e atributos de um mesmo posto de controle, a fim de poder estimar mais precisamente os limites de controle e, desta forma, estimar melhor a probabilidade de alarme falso (probabilidade de detectar que uma amostra é causa especial quando na verdade é causa comum). Uma vez identificada a estrutura de correlação entre as variáveis e atributos, poderia ser desenvolvida uma estatística mais precisa para o cálculo dos limites de controle da carta integrada do posto e da carta integrada global.

Nesta tese, foi utilizado o percentual de defeituosos como parâmetro comum entre atributos e variáveis para monitorar, de forma integrada, o posto de controle. Um estudo interessante seria identificar outras estatísticas, como por exemplo, a função de perda quadrática, para monitorar, de forma integrada, o posto de controle.

Outro tema importante para pesquisas futuras seria estudar a estrutura de correlação entre variáveis e atributos de postos diferentes, a fim de poder identificar uma relação de causa e efeito entre as variáveis e atributos. Desta forma, o Controle Integrado

da Qualidade permitiria identificar com maior facilidade a origem dos possíveis defeitos e auxiliar de forma mais efetiva na solução de problemas.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ACIMAC *A tecnologia de produção na indústria de pisos e azulejos*. São Paulo, 1998.
- AKAO, Y. *Quality function Deployment: integrating customer requirements into product design*. Cambridge: Productivity Press, 1990.
- ANFACER *Cerâmica Pisos e Revestimentos: Manual de Orientação Técnica*. São Paulo: Wissenbach/Archimídia, 1994.
- BARBA, A. *et alli Matérias primas par la fabricación de soportes de baldosas cerámicas*. Instituto de tecnologia Cerámica, Asociacion de investigacion de las indústrias Cerámicas, Universidad Jaume I. 1º Ed., 1997.
- BOX, G. E. P. *et alli* Quality practices in Japan. *Quality Progress*, Milwaukee, p. 37-41, mar., 1988.
- BROWN, P.G. QFD: echoing the voice of the customer. *AT&T Technical Journal*, New York, mar./apr., 1991.
- BYRNE, M. D. e TAGUCHI, S. The Taguchi approach to parameter design. *Quality Progress*, Milwaukee, p. 19-26, dec., 1987.
- CALLISTER, W. D. Jr. *Materials Science and Engineering: An Introduction*, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc (19\_\_).
- CAMPOS, V. F. *TQC: Controle da qualidade total (no estilo japonês)*. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1992.
- CATEN, C.S. e RIBEIRO, J.L. Gerenciando o CEP com a Função de Perda Quadrática. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 15º, 1995, São Carlos. *Anais do 15º ENEGEP*. São Carlos: ENEGEP, 1995.
- CATEN, C.S. e RIBEIRO, J.L., Modelagem da qualidade e custos usando uma função de perda multivariada - In: Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística, 1996, Caxambu. *Anais do SINAP*, v. 1, p. 112-113, Caxambu: SINAP, 1996.



- CATEN, C. S. e RIBEIRO, J. L. Controle Integrado de Atributos. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 18<sup>o</sup>, 1998, Niterói. *Anais do 18<sup>o</sup> ENEGEP*. Niterói: ENEGEP, 1998. (em CD ROM)
- CATEN, C.S., RIBEIRO, J.L. e FOGLIATTO, F. S. Etapas na Implantação do Controle Integrado do Processo e Estudo de Caso. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 19<sup>o</sup>, 1999, Rio de Janeiro. *Anais do 19<sup>o</sup> ENEGEP*. Rio de Janeiro: ENEGEP, 1999. (em CD ROM)
- DEMING, W. E. *Out of the Crisis* Center for Advanced Engineering Studies. Cambridge: Institute of Technology, 1986.
- DIDIER *Técnica Refratária: Materiais refratários e suas características*. Editora Didier-Werke, 1983.
- DUNCAN, A. J. *Quality Control and Industrial Statistics*, 5<sup>o</sup> ed. Chicago: Irwin, 1986.
- EUREKA, W.E. e RYAN, N.E. *QFD: Perspectivas gerenciais do Desdobramento da Função Qualidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1993.
- FABRE, A. J. Cerâmica de Revestimentos do Sul de Santa Catarina: Desafios da Globalização. *Revista de Tecnologia e Ambiente*, Criciúma, v. 2, n. 2, p. 11-30, jul./dez., 1996.
- FERREIRA, A. B. H. *Novo Dicionário da Língua Portuguesa*. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1975.
- FONSECA, H. F., FERNANDÉZ, H. T. e BERNARDIN, A. M. *Manual para a produção de cerâmica vermelha*. Santa Catarina: UFSC/SEBRAE, 199\_.
- GMBH, V. S. *Ceramic Monographs - Handbook of Ceramics*. Freiburg, Germanan, 1979.
- HAVENER, C. Improving the Quality of Quality. *Quality Progress*, Milwaukee, p.41-44, nov., 1993.
- HENGLER, H. C. M. *Caracterização de um fonolito ocorrente no Rio Grande do Sul como fundente cerâmico*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, Porto Alegre, 1998.
- HENRIQUE, P. *Relatório Técnico de Cerâmica*. Colégio Maximiliano Gaidzinski, Criciúma, 1997.

- HRADESKY, J. L. *Productivity & Quality Improvement: A Practical Guide to Implementing Statistical Process Control*. New York: McGraw-Hill, 1988.
- JONES, A., L., WODALL, W. H. e CONERLY, M. D. Exact Properties of Demerit Control Charts. *Journal of Quality Technology*, Milwaukee, v.31, n. 2, p. 217-234, apr. 1999.
- KING, R. *Better designs in half the time: implementing QFD in America*. Methuen: Goal/QPC, 1987.
- KINGERY, B. U. *Introduction to Ceramics*. New York: John Willey & Sons, 1960.
- KOURTI, T. e MacGREGOR, J. F. Multivariate SPC Methods for Process and Production Monitoring. *Journal of Quality Technology*, Milwaukee, v. 28, n. 4, p. 409-428, oct., 1996.
- KUME, H. *Métodos Estatísticos para Melhoria da Qualidade*, São Paulo: Editora Gente, 1993.
- LOWRY, C. A. e MONTGOMERY, D. C. A review of multivariate control charts. *IIE Transactions*, v. 27, p. 800-810, 1995.
- MASON, R. L., CHAMP, C. W., TRACY, N. D., WIERDA, S. J. e YOUNG, J. C. Assessment of Multivariate Process Control Techniques. *Journal of Quality Technology*, Milwaukee, v. 29, n.2, apr., 1997.
- MASON, R. L. e YOUNG, J. C. Why Multivariate Statistical Process Control? *Quality Progress*, Milwaukee, p. 88-93, dec., 1998.
- MIZUNO, S. e AKAO, Y. *QFD: the customer driven approach to quality planning and design*. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1994.
- MONTGOMERY, D.C. *Introduction to Statistical Quality Control*. New York: John Wiley and Sons, 1985.
- MONTGOMERY, D. C. e WOODALL, W.H. A Discussion on Statistically-Based Process Monitoring and Control. *Journal of Quality Technology*, Milwaukee, v. 29, n.2, apr., 1997.
- OTT, E. R. *Process Quality Control*. New York: McGraw-Hill, 1975.
- PALM, A. C., RODRIGUEZ, R.N., SPIRING, F. A. e WHEELER, D.J. Some Perspectives and Challenges for Control Charts Methods. *Journal of Quality Technology*, Milwaukee, v. 29, n.29, apr., 1997.



- PALMONARI, C. e TIMELLINI G. *Ceramic Floor and Wall Tile: Performance and Controversies*. Italian Ceramic Center. Itália, 1989.
- PEREZ, E. A. *Introdução a tecnologia cerâmica*. Castellon, 1983.
- PITT, H. *SPC for the rest of us: a personal path to Statistical Process Control*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1994.
- RIBEIRO, J.L. e CATEN, C. S. Custos da Qualidade e da Manufatura: Um Estudo de Caso na Indústria Química. *Revista Gestão & Produção*, São Carlos, v. 3, p.274-289, dez., 1996.
- RIBEIRO, J. L. e CATEN, C. S. *Desdobramento dos Processos em uma Empresa de Calçados*. Relatório Técnico 04/96. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, UFRGS, 1996a.
- RIBEIRO, J. L. e CATEN, C. S. *Implantação do CEP na Linha de Montagem de uma Empresa de Calçados*. Relatório Técnico 05/96. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, UFRGS, 1996b.
- RIBEIRO, J. L. e CATEN, C. S. Aspectos Importantes na Avaliação da Função de Perda Quadrática. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 16<sup>o</sup>, 1996c, Rio de Janeiro. *Anais do 16<sup>o</sup> ENEGEP*. Piracicaba: ENEGEP, 1996c. (em CD ROM)
- RIBEIRO, J. L e CATEN, C. S. *Controle Estatístico de Processo* Apostila de aula. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 1997.
- RIBEIRO, J. L e CATEN, C. S. Uma Sistemática para Controle Integrado de Processos. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 18<sup>o</sup>, 1998, Rio de Janeiro. *Anais do 18<sup>o</sup> ENEGEP*. Niterói: ENEGEP, 1998. (em CD ROM)
- RIBEIRO, J. L., CATEN, C. S. e FRITSCH, C. Controle Integrado de Processos. *Revista Produto e Produção*, Porto Alegre, v. 2, n. 3, p. 160-175, out., Porto Alegre, 1998.
- RIBEIRO, J. L., CATEN, C. S., FRITSCH, C. e LEITÃO, F. *Implantação do CEP em uma Empresa de Calçados*. Relatório Técnico 04/97. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 1997.
- RIBEIRO, J. L., CATEN, C. S. e LEITÃO, F. *Desdobramento dos Processos em uma Empresa de Calçados*. Relatório Técnico 02/97. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 1997.



- RIBEIRO, J. L. e ECHEVESTE, M. E. *Desdobramento da Qualidade em uma Empresa de Calçados*. Relatório Técnico 03/96. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, 1996.
- RIBEIRO, J.L., LEITÃO, F.B., ECHEVESTE, M.E. e CATEN, C.S., Identificação de processos críticos e implantação do CEP. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 17<sup>o</sup>, 1997, Rio de Janeiro. *Anais do 17<sup>o</sup> ENEGEP*. Gramado: ENEGEP, 1997. (em CD ROM)
- ROESCH, S. M. A. *A dissertação de mestrado em administração: Proposta de uma tipologia*. Série Documentos para Estudo 14/94. Programa de Pós Graduação em Administração, Administração, UFRGS, Porto Alegre, 1994.
- SCOTT, D. G., SCOTT, D. S. e ARNON, M. H. Real-time process monitoring for changing inputs. *Technometrics*, Milwaukee, v. 40, p. 283-292, nov. 1998.
- SITI *La tecnologia ceramica*. CRC. Novara, 1997.
- TAGUCHI, G. e CLAUSING, D. Quality Robust. *Havard Business Review*, Boston, jan./fev., 1990.
- TAGUCHI, G.; ELSAYED, E. A. e HSIANG, T. *Engenharia de Qualidade em Sistemas de Produção*. São Paulo: McGraw-Hill, 1990.
- WERKEMA, M. C. C. *Ferramentas Estatísticas Básicas para o Gerenciamento do Processo*, Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1995.
- WIRTH, ECHEVESTE, RIBEIRO, J. L. e CATEN, C. S. *Controle estatístico do processo: um estudo de caso em indústria de calçados*. Relatório Técnico 05/98. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, UFRGS, 1998.
- WOODALL, W. H. Control Charts Based on Attribute Data: Bibliography and Review, *Journal of Quality Technology*, Milwaukee, v. 29, n. 2, apr. 1997.
- ZANDONADI, A. R. *Curso Internacional de Treinamento em Grupo em Tecnologia Cerâmica*. IPT/JICA. São Paulo, ago. 1993.